

# 含金属芯压电纤维的驱动特性研究\*

边义祥<sup>1</sup>, 裘进浩<sup>2</sup>

(1. 扬州大学 机械工程学院, 江苏 扬州 225127;

2. 南京航空航天大学 智能材料与结构研究所, 江苏 南京 210016)

**摘要:** 针对含金属芯压电纤维这种新型驱动器的确定特性, 建立了悬臂杆结构含金属芯压电纤维驱动器的理论模型。根据第一类压电方程, 推导出了自由端位移、夹持力和纵向共振频率的解析表达式, 分析了金属芯性能和半径对这 3 个参数的影响; 并把理论计算结果和有限元分析结果进行了比较。通过实验测量了自由端位移和夹持力。理论和实验结果表明, 这种驱动器端部有较小的位移 1.8  $\mu\text{m}$ 、较大的夹持力 150 mN、较高的一阶共振频率 25.21 kHz。

**关键词:** 金属芯; 压电纤维; 压电驱动器

中图分类号: O738; TM282; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)12-1440-04

## Reseach on characterization of actuator of metal piezoelectric fiber

BIAN Yi-xiang<sup>1</sup>, QIU Jin-hao<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 2. Key Lab of Smart Materials and Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Aiming at the description of the characteristics of metal core piezoelectric fiber (MPF) actuator, the mechanical mode of the new type actuator was established. According to the constitutive piezoelectric equations, the analytical expressions of the tip displacement, the blocking force and the natural frequencies were derived. The effect of the diameter and Young's modulus of the metal core on these properties were investigated based on the analytical equations. And the results were compared with those of the finite element method. The tip displacement and blocking force were measured experimentally. Analytical and experimental results indicate that the actuator can give a small displacement as 1.8  $\mu\text{m}$ , a big blocking force as 150 mN, and a high first mode resonance frequency as 25.21 kHz.

**Key words:** metal core; piezoelectric fiber; piezoelectric actuator

## 0 引 言

压电材料由于具有直接的机电转换功能, 既可以用作传感器, 也可以用作驱动器, 受到了广泛的关注和研究<sup>[1]</sup>。在压电材料的研究中, 有两个重要的趋势: ①提高材料本身的各项性能, 从而提高压电器件的整体性能; ②研究和设计特殊形状的压电器件, 以适应新的使用需求<sup>[2]</sup>。

最近, 裘进浩等<sup>[3]</sup>和 H. Sato 等<sup>[4]</sup>先后研制成功的含金属芯的压电陶瓷纤维 MPF (Metal-core Piezoelectric Ceramic Fibers), 就是一种新型的压电器件。在

MPF 中, 金属芯位于正中心位置, 外面包裹着压电陶瓷; 金属芯可以用作一个电极, 另一个电极是喷镀在陶瓷表面的一层金属层。单根 MPF 既可以用作传感器, 也可以用作驱动器。当纤维的整个表面都喷镀上金属层电极后, 外加电场, 纤维将沿着长度方向产生伸缩变形。由于结构细小, MPF 可以很方便地埋入到复合材料中, 用于结构健康监测、振动控制等。

G. Sebald 等<sup>[6]</sup>建立了 MPF 的物理振动模型, 分析了 MPF 的纵向振动和其压电常数、介电常数和杨氏模量, 并研究了 MPF 的机电特性; H. Sato 等<sup>[7]</sup>测量了 MPF 的机械性能。并通过把 MPF 粘贴在复合材料梁

收稿日期: 2011-06-10

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(90923029); 江苏省创新学者攀登计划资助项目(BK2009020)

作者简介: 边义祥(1973-), 男, 江苏沭阳人, 讲师, 博士, 主要从事智能驱动器、传感器方面的研究。E-mail: bianyiqiang@163.com

的表面,利用 MPF 的传感和驱动性能制作了智能复合材料悬臂梁;K. Takagi 等<sup>[8-9]</sup>通过在碳纤维复合材料中埋入 MPF,实现了梁的振动控制和结构损伤监测;D. Askari 等<sup>[10]</sup>分析了 MFC 和 MPF 的机械性能异同点。H. Sato 等<sup>[11]</sup>还从电极配置、机电转换效率、机械性能、所需电场等方面分析了 MFC 和 MPF 之间的区别。

MPF 用作驱动器时,有 3 个特性最为重要,即驱动器的位移、夹持力和共振频率。MPF 作为一种新型的压电驱动器,需要对这 3 个驱动特性进行深入的研究和分析,以便进一步优化设计,更好地发挥其驱动性能。

本研究首先从理论上建立这种悬臂杆结构压电驱动器的理论模型,导出自由端位移、夹持力和纵向共振频率的解析表达式;并用理论计算和有限元分析方法进行验证。最后,利用实验对理论结果进行验证。

## 1 MPF 驱动器的理论模型

### 1.1 压电方程

MPF 的几何形状如图 1 所示,金属芯位于正中位置,半径为  $R_m$ ,外围的陶瓷内部半径和金属芯相同,外部半径为  $R_c$ ,MPF 的长度为  $L$ 。由于 MPF 是圆柱形状,为了研究方便,采用圆柱坐标系。压电方程的直角坐标系和圆柱坐标系的对应关系为,1 对应  $z$ ,2 对应  $\theta$ ,3 对应  $r$ 。

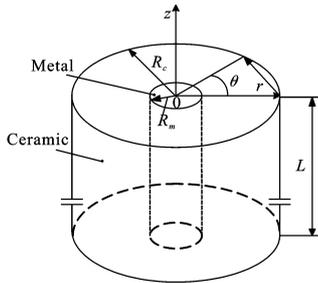


图 1 MPF 的几何形状及圆柱坐标系

外加电压时,压电陶瓷内部的电场分布比较复杂,为了研究方便,可以认为其电场沿径向分布,其极化方向也认为是径向分布。由于表面覆盖的金属层很薄,可以忽略其影响。MPF 用作悬臂杆结构时,假设压电陶瓷部分在径向可以自由伸缩。和长度相比,MPF 的半径很小,其圆周方向的应力也可以忽略。在电极上外加电压后,其应力和电场的边界条件可以分别表示为:

$$T_{rr} = T_{\theta\theta} = T_{r\theta} = T_{\theta z} = T_{rz} = 0 \quad (1)$$

$$E_{\theta} = E_z = 0 \quad (2)$$

所加电场方向和极化方向相反时,压电陶瓷产生伸长变形。在第一类压电方程中,由于  $E_r$  取负值,压电陶瓷部分的应变和电位移分别表示为:

$$S_1^p = s_{11}^E T_1^p + d_{31} E_r \quad (3)$$

$$D_3^p = d_{31} T_1^p + \varepsilon_{33}^T E_r \quad (4)$$

式中: $S_{ij}^E$ —应变, $T_{ij}^p$ —应力, $D_i$ —电位移, $E_i$ —电场强度, $s_{ij}^E$ —弹性柔顺系数, $d_{ij}^T$ —压电常数, $\varepsilon_{ij}^T$ —介电常数,上标“p”—压电陶瓷部分。

金属芯的应力应变关系为:

$$S_m = s_{11}^m T_1^m \quad (5)$$

式中:上标“m”—金属芯。

### 1.2 MPF 的驱动位移

由于金属芯和陶瓷部分结合紧密,可以认为受到电场激励或外力作用时,金属芯和陶瓷部分沿轴向的应变相同,设为  $S$ 。当外加电压为  $V$ ,则由式(3)得陶瓷部分的应力为:

$$T_1^p = \frac{S}{s_{11}^E} \pm \frac{1}{s_{11}^E} d_{31} E_r \quad (6)$$

式中:“+”号—电场强度方向与极化方向相反,“-”号—电场强度与极化方向相同。

在本研究中,假设电场强度方向和极化方向相反。陶瓷部分由于是圆柱形状,其电场强度为:

$$E_r = \frac{V}{r \ln \frac{R_c}{R_m}} \quad (7)$$

代入式(6),得到陶瓷部分的应力为:

$$T_1^p = \frac{S}{s_{11}^E} + \frac{1}{s_{11}^E} \frac{d_{31} V}{r \ln \frac{R_c}{R_m}} \quad (8)$$

由式(5)得到金属芯部分的应力为:

$$T_1^m = \frac{S}{s_m} \quad (9)$$

则整个 MPF 的所受外加合力为:

$$F = \int_0^{2\pi} \int_{R_m}^{R_c} \left( \frac{S}{s_{11}^E} + \frac{1}{s_{11}^E} \frac{d_{31} V}{r \ln \frac{R_c}{R_m}} \right) r dr d\theta + \int_0^{2\pi} \int_0^{R_m} \frac{S}{s_m} r dr d\theta \quad (10)$$

只对悬臂杆结构的 MPF 施加电压时,其外加合力为 0,求得应变为:

$$S = \frac{2s_m d_{31} (R_m - R_c) V}{(s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11}^E R_m^2) \ln \frac{R_c}{R_m}} \quad (11)$$

由此,得到 MPF 自由端的位移:

$$\delta = LS = \frac{2s_m d_{31} (R_m - R_c) LV}{(s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11}^E R_m^2) \ln \frac{R_c}{R_m}} \quad (12)$$

可以看出,悬臂杆结构的 MPF 自由端位移和其长度以及所加电压成正比。

为了研究金属芯对 MPF 的自由端位移的影响,笔者采用理论计算和有限元分析的方法进行研究。由于

在 MPF 的制作过程中,要经过高温煅烧,所选用的金属芯材料必须能够耐高温,经过比较,本研究选用铂金(Platinum, Pt)或钨(Wolfram, W)作为金属芯材料。其材料性能如表 1 所示。

表 1 MPF 的材料性能

材料	PNN-PZT	Pt	W
$\rho /(\times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3})$	8.0	19.6	19.3
$s_{11}^E /(\times 10^{-12} \text{ m}^2\cdot\text{N}^{-1})$	20.6	—	—
$d_{31} /(\times 10^{-12} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1})$	-112	—	—
$s_m /(\times 10^{-12} \text{ m}^2\cdot\text{N}^{-1})$	—	5.95	2.90

当保持外加电压 100 V 不变时,设所选的 MPF 的外径 250  $\mu\text{m}$ 、长度 25 mm 为定值。此时,式(12)变为:

$$\delta = \frac{2s_m L d_{31} V}{R_c (s_{11}^E B^2 + s_m - s_m B^2)} \frac{B-1}{\ln \frac{1}{B}} \quad (13)$$

把几何尺寸和材料参数代入到公式中,可以得到 MPF 端部位移的理论计算结果。为了验证理论计算的结果,本研究采用 ANSYS 软件,对 MPF 外加电压后的位移进行有限元分析,并把结果和理论计算的结果在作了比较,如图 2 所示。结果表明,理论值和有限元分析值基本吻合。

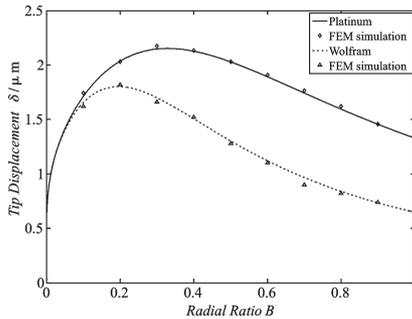


图 2 外加电压不变时 MPF 的端部位移

从图 2 中可以看出,随着半径比的增加,MPF 的端部位移有一个最大值,含铂金芯的 MPF 在半径比为 0.32 时端部位移达到最大值,而含钨芯 MPF 在半径比为 0.19 时端部位移达到最大值。由此,在设计 MPF 时,为了得到最大的端部位移,可以设计相应的半径比。而且,由于铂金的弹性模量比钨小,在相同的条件下,可以得到比较大的端部位移。

另外,可以看到,随着半径比趋近于 1,其端部挠度并不趋近于 0。这是由于随着半径比的增加,在电压不变的情况下,其电场强度快速增大的结果。而在实际使用中,电场强度太大时,压电陶瓷容易被击穿。因此,其电场强度是受到限制的,在理论上的无限增大的情况是不可能发生的。

### 1.3 MPF 的夹持力

当悬臂杆结构的 MPF 受到外加电压而产生伸缩变形时,如果保持自由端的位置不变,则需要在自由

端外加轴向力,通常称之为夹持力。夹持力的大小为:

$$F = \pi(R_c^2 - R_m^2) \frac{S}{s_{11}} + \pi R_m^2 \frac{S}{s_m} \quad (14)$$

把式(11)中的应变代入上式,得:

$$F = \frac{2\pi d_{31} V (R_m - R_c)}{s_{11}^E \ln \frac{R_c}{R_m}} \quad (15)$$

可见,MPF 的夹持力与外加电压成正比,而与长度无关,也与金属芯的弹性柔顺系数无关。

为了研究金属芯对夹持力的影响,笔者同样采用理论计算和有限元分析的方法进行研究。如果所加电压不变,均为 100 V,式(15)写为:

$$F = \frac{2\pi d_{31} V R_c}{s_{11}^E} \cdot \frac{B-1}{\ln \frac{1}{B}} \quad (16)$$

则夹持力的理论计算和有限元分析结果如图 3 所示。

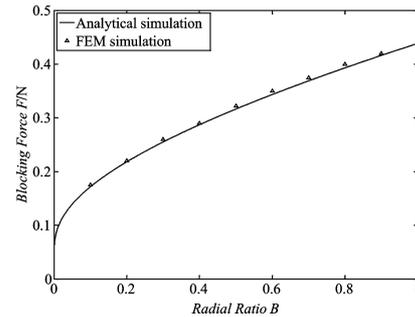


图 3 外加电压不变时 MPF 的夹持力

由图 3 可以看出,随着半径比的增加,相应的夹持力也逐渐增大,原因还是前面所述的,是由于电场强度也很快增大。在保证 MPF 工作安全、不被击穿的前提下,为了得到大的夹持力,当外加电压不变时,可以适当地增加半径比。

### 1.4 MPF 的纵向共振频率

为了研究纵向共振频率,本研究把 MPF 看作一个整体。当受到轴向力  $F$  时,设其应变为  $S$ 。则由式(11)得:

$$S = \frac{s_m s_{11}^E}{\pi(s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11}^E R_m^2)} F \quad (17)$$

又由于:

$$S = \frac{E}{EA} \quad (18)$$

式中: $E$ —MPF 的等效弹性模量; $A$ —截面积。

联立式(17)和式(18),解得:

$$E = \frac{s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11}^E R_m^2}{s_m s_{11}^E R_c^2} F \quad (19)$$

设 MPF 的等效密度为  $\rho$ ,则:

$$\rho = \frac{R_m^2 \rho_m + \rho_c R_c^2 - \rho_c R_m^2}{R_c^2} \quad (20)$$

式中: $\rho_m$ —金属芯的密度, $\rho_c$ —压电陶瓷的密度。

悬臂杆结构的 MPF 的第  $r$  阶纵向共振频率为<sup>[12]</sup>:

$$f_r = \frac{\omega_r}{2\pi} = (r - \frac{1}{2}) \frac{v}{2L} \quad r = 1, 2, 3 \dots \dots \quad (21)$$

式中: $v$ —纵向弹性波在 MPF 中的传播速度, $v = \sqrt{E/\rho}$ 。

把式(19)和式(20)代入式(21),得第 1 阶纵向共振频率为:

$$f_1 = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{s_m R_c^2 - s_m R_m^2 + s_{11} R_m^2}{s_m s_{11} (R_m^2 \rho_m + \rho_c R_c^2 - \rho_c R_m^2)}} \quad (22)$$

把  $B$  代入式(22),得:

$$f_1 = \frac{1}{4L} \sqrt{\frac{s_m - s_m B^2 + s_{11} B^2}{s_m s_{11} (B^2 \rho_m + \rho_c - \rho_c B^2)}} \quad (23)$$

和上节一样,笔者采用理论计算和有限元分析的方法研究金属芯对 MPF 第 1 阶纵向共振频率的影响,其结果如图 4 所示。

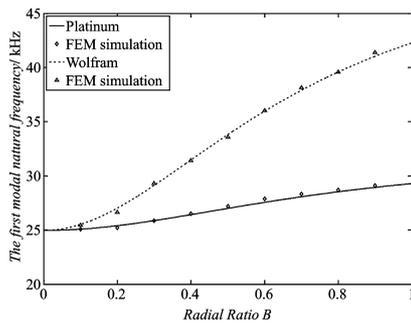


图 4 MPF 的第 1 阶纵向振动频率

从图 4 中看出,理论计算和有限元分析的结果基本相同,MPF 具有较高的纵向共振频率,远高于一般使用时外加电压的激励频率。随着半径比的增大,共振频率也相应增大。由于钨的弹性模量大于铂金,含钨芯的 MPF 比含铂金芯 MPF 的共振频率要高。

## 2 实验研究

为了验证上述理论的正确性,本节进行实验研究。由于 MPF 的共振频率很高,由图 4 可知,当给定  $R_c=125 \mu\text{m}$ 、 $R_m=25 \mu\text{m}$ 、 $L=25 \text{mm}$  时,MPF 的一阶纵向共振频率达到 25.21 kHz。一般情况下,激励电压的频率远低于 MPF 的一阶共振频率,因此,本研究主要对 MPF 的驱动位移和驱动力进行实验验证,所建立的实验系统如图 5 所示,把 MPF 的一端粘接在工作台上,另一端自由,形成悬臂杆结构的 MPF。在 MPF 的金属芯和外层电极上施加电压,用光纤位移传感器测量自由端的应变,用微力传感器测量自由端的夹持力。所用的 MPF 的几何尺寸如上所述,其余材料性能如表 1 所示。

MPF 的自由端位移和夹持力的理论计算和实际

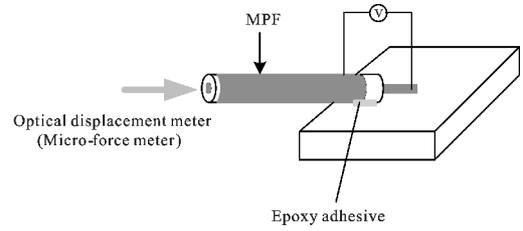


图 5 MPF 位移和夹持力实验图

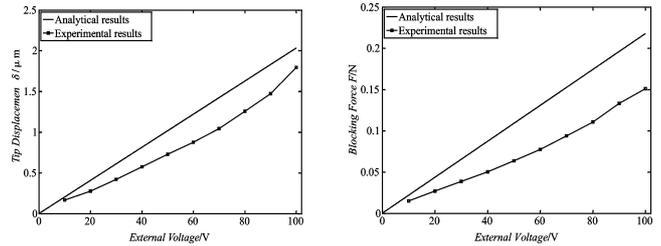


图 6 MPF 位移和夹持力实验结果

测量的结果如图 6 所示。

由图 6 可见,随着外加电压的增大,悬臂杆结构的 MPF 的自由端位移和夹持力基本成线性增大;MPF 的端部位移和夹持力的理论值和测量值都存在误差。产生误差的主要原因是:理论计算采用的压电陶瓷的参数都是表 1 中的参数,而 MPF 由于制作工艺复杂,其参数很难达到理论值,实测值要小于理论值。

## 3 结束语

为了深入研究 MPF 这种新型压电驱动器的驱动特性,本研究建立了悬臂杆结构 MPF 驱动器的理论模型,推导出自由端位移、夹持力和纵向共振频率的解析表达式;分析了 MPF 的几何尺寸对其驱动性能的影响;并用理论计算和有限元分析的方法详细研究了金属芯对 MPF 驱动器的自由端位移、夹持力和纵向共振频率的影响。实验和有限元分析结果表明,MPF 驱动器夹持力较大,最大可以达到 150 mN,而其位移较小,最大只有 1.8  $\mu\text{m}$ ,纵向共振频率很高,一阶固有共振频率可以达到 25.21 kHz。有限元分析的结果和理论值基本吻合。该模型为 MPF 这种新型驱动器的优化设计和进一步研究打下了很好的理论基础。

### 参考文献 (References):

- [1] TANI J, TAKAGI T, QIU J. Intelligent materials systems: application of functional materials[J]. **Applied Mechanics Reviews**, 1998, 51(8): 505-521.
- [2] SEBALD G, QIU J, GUYOMAR D, et al. Modeling and characterization of piezoelectric fibers with metal core. [J]. **Japanese Journal of Applied Physics**, 2005, 44 (8): 6156-6163.

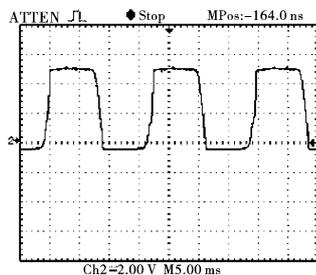


图 8 在  $E_a$  口检测到的 A 相反电势波形

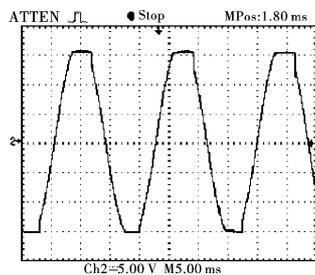


图 9 A 相端电压  $u_a$  波形

行带负载试验,试验结果表明,电机启动稳定,转矩脉动小,系统运行稳定。

## 5 结束语

本研究在分析了两相无槽无刷直流电机的结构特点的基础上,采用反电势过零点检测法实现了两相无槽无刷直流电机的无传感器控制;设计并实现了两相无刷直流电机的控制方案,其硬件系统中的逆变驱动电路具有特殊的上下桥臂互锁功能,使得系统控制线路不仅简单而且可靠。

试验结果表明,所介绍的两相无槽无刷直流电机控制方案,运行稳定、转矩脉动小,对于小功率的两相无刷直流电机控制而言,具有较高的实际应用意义。

## 参考文献(References):

- [1] 吴筱辉,程小华,刘杰. 反电势法检测转子位置的直流无刷电机系统起动方法[J]. 中小型电机,2005,32(5):60-63.
- [2] 姜吉顺,季画,李志永. 无位置传感器无刷直流电机的位置检测方法[J]. 电机与控制应用,2007,34(2):56-60.
- [3] 李自成,程善美,蔡凯,等. 反电动势过零检测无刷直流电机转子位置新方法[J]. 电工技术学报,2009,24(7):52-58.
- [4] 吴春华,陈国呈,孙承波. 一种改进的无刷直流电机无位置传感器检测技术[J]. 电气传动自动化,2005,27(3):31-33.
- [5] WU Hong-xing, LIU Ying, KOU Bao-quan, et al. Research for Brushless Motor Controller using Winding Back-EMF to Detect Rotor Position [C]//2008. ICST 2008.3rd International Conference on Sensing Technology. Lillehammer: [s.n.], 2009: [s.n.].
- [6] 侯磊. 无位置传感器无刷直流电机调速系统的研究[D]. 济南:山东大学控制科学与工程学院,2007.
- [7] 魏静微,张宏宇. 无槽永磁无刷电动机设计研究[J]. 微电机,2010,49(2):9-11.
- [8] 周敏德. 永磁无刷直流电动机设计中的几个问题[J]. 电机技术,1996,(4):39-41.
- [9] 刘小正,赵小春. 两相无刷直流电机及其系统仿真[J]. 微电机,2006,39(4):8-11.
- [10] Atmel Corporation. AVR440: Sensorless control of two-phase brushless DC motor[M]. Atmel Corporation, 2005.

[编辑:李辉]

(上接第 1443 页)

- [3] QIU J, YAMADA N, TANI J, et al. Fabrication of Piezoelectric Fibers with Metal Core [C]//Proceedings Of SPIE's 10th International Symposium on Smart Structures and Materials, Active Materials: Behavior and Mechanics, San Diego, CA, USA: SPIE, 2003: 475-483.
- [4] SATO H, SEKIYA T, NAGAMINE M. Design of the Metal-core Piezoelectric Fiber [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems, Bellingham, WA: SPIE, 2004: 97-103.
- [5] SEBALD G, QIU J, GUYOMAR D. Modeling the lateral resonance mode of piezoelectric fibers with metal core. [J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2005, 38: 3733-3740.
- [6] SEBALD G, BENAYAD A, QIU J, et al. Electromechanical characterization of 0.55Pb (NiNb)O-0.45Pb (Zr0.3Ti0.7)O3 fibers with Pt core [J]. **Journal of Applied Physics**, 2006, 100: 1-6.
- [7] SATO H, NAGAMINE M. Mechanical Properties of Metal-core Piezoelectric Fiber [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials 2005: Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA: SPIE, 2005: 623-629.
- [8] TAKAGI K, SATO H, SAIGO M. Robust Vibration Control of

the Metal-core Assisted Piezoelectric Fiber Embedded in CFRP Composite [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA: SPIE, 2004: 376-385.

- [9] TAKAGI K, SATO H, SAIGO M. Damage Detection and Gain-scheduled Control of CFRP Smart Board Mounting the Metal Core Assisted Piezoelectric Fiber [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems. Bellingham, WA: SPIE, 2005: 471-480.
- [10] ASDARI D, ASANUMA H, Mehrdad N, et al. A Comparative Study on Macro-fiber Composites and Active Fiber Composites with Metal-core Piezoelectric Actuators/sensors [C]//Proceedings of SPIE, Smart Structures and Materials, Smart Structures and Integrated Systems. San Diego, CA, United States: SPIE, 2006: 1-12.
- [11] SATO H, SEKIYA T, SHIMOJO Y. Fabrication and Vibration Suppression Behavior of Metal Core-piezoelectric Fibers in CFRP Composite [C]//Proceedings of Transducing Materials and Devices. Brugge, Belgium. [s.n.], 2003: 80-87.
- [12] MEIROVITCH L. Analytical methods in vibrations[M]//New York: Macmillan Publishing Co. Inc., 1967: 149-154.

[编辑:李辉]