

压电纤维复合材料智能传感器的有限元预测与器件性能*

高裕昆¹⁾ 赵洁¹⁾ 周晶晶^{2)†} 周静^{3)4)‡}

1) (青岛瓷兴新材料有限公司, 青岛 266000)

2) (阜阳师范大学安徽省重点实验室信息功能材料与器件, 阜阳 236000)

3) (武汉理工大学材料工程学院, 武汉 430000)

4) (武汉理工大学三亚科教创新园, 三亚 572024)

(2024年9月30日收到; 2024年11月30日收到修改稿)

压电纤维复合材料 (macro fiber composite, MFC) 具有高压电性、高柔韧性和低损耗等优点, 被广泛应用于航空、航天、民用和军事等领域。然而, 目前 MFC 传感器的研究主要聚焦于材料应用, 对于 MFC 传感器件仿真建模还缺乏系统性的研究。本工作分别建立了代表性体积元模型、直接模型和混合模型, 从细节到整体、从微观到宏观对 MFC 的有限元模型进行了建模和分析。一方面通过等效体积元模型, 掌握 MFC 内部的电场分布规律, 为力-电耦合提供理论依据; 另一方面通过直接模型和混合模型, 对 MFC 的实体结构进行整体建模和边界条件的加载, 为 MFC 贴片式传感和共振式传感的分析提供理论依据, 有效预测了 MFC 智能元件传感器的传感性能。仿真结果表明, 共振式传感器性能远优于贴片式传感器, 当激振加速度为 5 m/s^2 、悬臂梁基板长度为 80 mm 时, 计算得到的 MFC 共振式传感器的谐振频率为 67 Hz , 输出电压为 4.17 V 。实验结果表明, MFC 传感器测试的谐振频率为 74 Hz , 输出电压为 3.59 V , 仿真计算结果与 MFC 传感器预测结果基本符合。此外, MFC 传感器在低频工作时具有优异的传感灵敏度, 传感灵敏度为 7.35 V/g 。可见, MFC 在低频共振时具有优异的传感特性, 构建的 3 种有限元模型可以有效预测 MFC 传感器的传感性能, 为 MFC 传感器的性能预测提供了保障。

关键词: 压电纤维复合材料 (MFC), 传感器, 性能预测, 有限元模型

PACS: 77.84.Lf, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.74.20241379

CSTR: 32037.14.aps.74.20241379

1 引言

1999年, 美国航天局 (NASA)^[1-3] 提出了宏观压电纤维复合材料 (macro fiber composite, MFC), 将压电陶瓷纤维、聚合物基体以及叉指电极复合成具有三明治多层结构的智能材料, 如图 1(a) 所示, 这种结构充分发挥了压电陶瓷纤维长度方向的压电效应, 解决了对正交各向异性传感和驱动能力的

需求, 具有高压电性、高柔韧性、高机电耦合系数和低损耗等优点^[4-8]。

随着 MFC 研究技术的深入发展, 学者们利用 MFC 内部复杂的结构, 研发出了不同的工作响应模式: 包括 d_{33} 型、 d_{31} 型和 d_{15} 型^[9-13] 等。其中, d_{33} 型 MFC 的极化方向和施加的电场方向一致且均沿着纤维长度方向, 利用了纤维长度方向的压电效应, 因此可以在长度方向累积压电效应, 具有优异的驱动和传感性能, 如图 1(b) 所示。 d_{33} 型工作

* 信息功能材料结构与器件安徽普通高校重点实验室开放课题 (批准号: FMDI202407)、阜阳师范大学青年人才基金重点项目 (批准号: rcxm202402) 和海南省自然科学基金创新研究团队项目 (批准号: 524CXTD431) 资助的课题。

† 通信作者。E-mail: 202401001@fynu.edu.cn

‡ 通信作者。E-mail: zhoujing@whut.edu.cn

模式是目前 MFC 应用最广泛的一种工作模式, d_{33} 型 MFC 作为传感智能元件在航空、航天、民用和军事等领域发挥着至关重要的作用. Discalea 等^[14] 基于 MFC 研究了无人机机翼蒙皮翼梁连接处复合材料粘接状态的监测, 基于有限元分析对频散波传播问题进行了数值研究, 研究了复合材料蒙皮的铺层方式、粘结缺陷和界面脱粘下的超声导波监测, 研究证明了 MFC 具有良好的灵敏度, 可用于机载监测系统. Konka 等^[15] 对 MFC 的传感器性能进行了系统性研究, 确定了 MFC 作为嵌入式传感器的功能优点, 包括可以检测到复合材料的加载条件、服役损伤和疲劳失效等. 测试了嵌入式 MFC 传感器玻璃纤维-环氧复合材料层压板样品中的应力应变变化规律. 研究验证了 MFC 能够有效传感机械应力应变的变化, 输入机械应力和输出电压之间存在线性关系. Pearson 等^[16] 提出了 MFC 传感器的新型应用方式, 将两个 MFC 粘贴在航空航天用复合材料面板上, 在 100, 300 和 500 kHz 频率范围内不仅可以检测复合材料遭遇冲击破坏时释放的声发射 (AE), 还可以作为脉冲接收器进一步量化损伤. 此外, MFC 的传感性能还被创新地应用于无线传输、导波传递等各领域^[17-19].

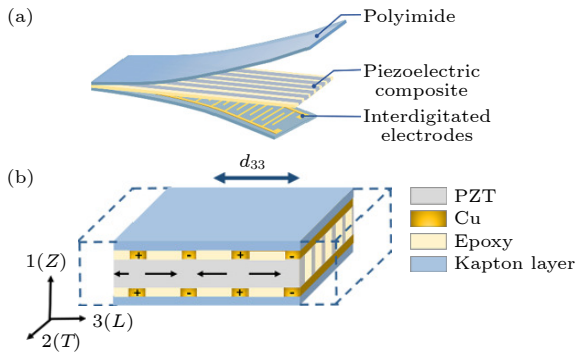


图 1 (a) 宏压电纤维复合材料结构; (b) 压电纤维复合材料工作模式

Fig. 1. (a) Macro fiber composite structure; (b) working mode of macro fiber composite.

然而, 目前 MFC 传感器的研究主要聚焦于材料的应用, 对于 MFC 传感器建模的研究一般是基于等效体积元模型和对称边界条件对应力、应变和电场等单元模块的变化情况进行分析. 但是, 由于受模型复杂性限制, 对于 MFC 传感器的整体建模模型缺乏系统性研究, 对于 MFC 的传感性能预测还缺乏有效的建模. 特别是航空航天领域用 MFC 传感器, 由于航空航天材料一般使用轻质的铝合金材料等, 结构受激发的高灵敏传感一直是制约传感特性进一步发展的主要因素. 本工作基于有限元分析方法对 MFC 传感器进行建模, 一方面通过代表性体积元 (representative volume element, RVE) 模型, 掌握 MFC 传感器内部的电场分布, 为力-电耦合提供理论依据; 另一方面通过使用直接模型和混合模型对 MFC 不同传感形式进行分析, 对于 MFC 智能元件传感器的传感性能做出预测, 实验结果表明, MFC 的有限元建模可以有效预测 MFC 传感器的传感性能, 为 MFC 传感器的性能预测提供了保障.

2 理论分析与建模

2.1 理论模型设计与分析

代表性体积元模型通常用于多尺度计算, 特别是在模拟材料微观性能对宏观行为的影响时, 它通过选取一个具有代表性的微小体积单元来模拟整个材料的性能, 这个单元应足够大以包含材料的所有关键微观特征, 同时又要足够小以在宏观尺度上可被视为均匀介质. MFC 的代表性体积元模型理论研究基础是基于复合材料的等效原则、混合定则和压电本构方程对 MFC 的应力、应变、电位移和电场之间的关系进行分析, 基于平面应力假设将 MFC 看成多层复合材料, 忽略对应力或电场贡献较小的矢量分量^[20-22]. 采用的等效压电本构方程如 (1) 式所示进行理论分析:

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{32} \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{22}^T & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

其中, S_i 和 D_k 分别代表应变分量和电位移分量, T_j 和 E_l 分别表示应力分量和电场分量, s_{ij}^E 表示恒电场下的柔性常数分量 (单位为 m^2/N), d_{kj} 是压电常数分量 (单位为 C/N), ε_{kl}^T 代表恒应力下的介电常数分量 (单位为 F/m). 当下标 $i, j = 1, 2, 3$ 时, S_i 和 T_j 分别代表在三维坐标系的正方向的分量; 当下标 $i, j = 4, 5, 6$ 时, S_i 和 T_j 分别代表在三维坐标系的剪切方向的分量. 基于平面应力假设和均匀场理论可知: d_{33} 型工作模式的 MFC 厚度方向的应力很小, 可以忽略不计, 因此假设应力 $T_1=0$; 电场主要加载在纤维的长度方向 (即“3”方向), 其他方向的微弱电场可以忽略不计, 因此 $E_1 = E_2 = 0$.

将 MFC 看成压电等效体, 由于功能相 PZT-5H 为四方相晶体结构 $P4mm$ 点群, 存在 $d_{32} = d_{31}$, $d_{24} = d_{15}$, $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22}$, $s_{11} = s_{22}$, $s_{44} = s_{55}$, $s_{13} = s_{23} = s_{32}$, 则 (1) 式可以简化成 (2) 式:

$$\begin{Bmatrix} S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{s}_{22}^E & \tilde{s}_{23}^E & 0 & 0 & 0 & \tilde{d}_{31} \\ \tilde{s}_{23}^E & \tilde{s}_{33}^E & 0 & 0 & 0 & \tilde{d}_{31} \\ 0 & 0 & \tilde{s}_{44}^E & 0 & 0 & \tilde{d}_{33} \\ 0 & 0 & 0 & \tilde{s}_{44}^E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \tilde{s}_{66}^E & 0 \\ \tilde{d}_{31} & \tilde{d}_{31} & \tilde{d}_{33} & 0 & 0 & \tilde{\varepsilon}_{33}^T \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_3 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

其中, 顶标“~”代表 MFC 的复合材料层的等效参数, 由此可以看出 MFC 的应力、应变、电位移和电场之间的关系. 基于梅得林 (Mindlin) 经典层合板的变形理论 [23,24], 可以发现, MFC 的压电相和聚合物相在某些方向存在应力或应变相等的情况, 如 (3) 式所示:

$$\begin{cases} \tilde{T}_2 = T_2^P = T_2^E, & \tilde{T}_4 = T_4^P = T_4^E, \\ \tilde{T}_6 = T_6^P = T_6^E, & \tilde{S}_3 = S_3^P = S_3^E, \\ \tilde{S}_5 = S_5^P = S_5^E, & \tilde{E}_3 = E_3^P = E_3^E, \end{cases} \quad (3)$$

其中, 上标“P”代表压电陶瓷, 上标“E”代表环氧树脂. 对于其他参数, 可以通过引入陶瓷百分比 v 应用平均值来表示, 如 (4) 式所示:

$$\begin{cases} \tilde{T}_3 = vT_3^P + (1-v)T_3^E, \\ \tilde{T}_5 = vT_5^P + (1-v)T_5^E, \\ \tilde{S}_2 = vS_2^P + (1-v)S_2^E, \\ \tilde{S}_4 = vS_4^P + (1-v)S_4^E, \\ \tilde{S}_6 = vS_6^P + (1-v)S_6^E, \\ \tilde{D}_3 = vD_3^P + (1-v)D_3^E. \end{cases} \quad (4)$$

进一步推导可以获得 MFC 的压电等效参数, 如 (5) 式和 (6) 式所示:

$$\tilde{d}_{33} = \frac{vd_{33}^P Y_L^P}{vY_L^P + (1-v)Y_L^E}, \quad (5)$$

$$\tilde{d}_{31} = \frac{vd_{33}^P Y_L^P [v\mu^P + (1-v)\mu^E]}{vY_L^P + (1-v)Y_L^E} + v(d_{31}^P + d_{33}^P \mu^P), \quad (6)$$

其中, d_{33}^P 代表压电陶瓷矩阵的压电常数 d_{33} , d_{31}^P 代表压电陶瓷矩阵的压电常数 d_{31} , Y_L^P 代表压电陶瓷在纤维长度方向的杨氏模量, Y_L^E 代表环氧树脂在纤维长度方向的杨氏模量, μ^P 代表压电陶瓷的泊松比, μ^E 代表环氧树脂的泊松比.

代表性体积元模型虽然可以对 MFC 的应力、应变或电学性能做出高效的计算, 但是, 其计算结果多为预估结果且边界条件受小应变梯度或周期性条件限制而定义困难, 因此, 基于模型的实际精度需求, 本工作进一步采取了直接模型和混合模型进行建模和分析. 为了进一步厘清 MFC 的电输出性能, 对 MFC 的机电耦合进行了分析和推导, 构建悬臂梁模型如图 2 所示.

根据 Euler-Bernoulli 理论, 层合梁轴向应变和曲率半径的关系为

$$S_3(x, z, t) = -z \frac{\partial^2 w_{rel}(x, t)}{\partial x^2}, \quad (7)$$

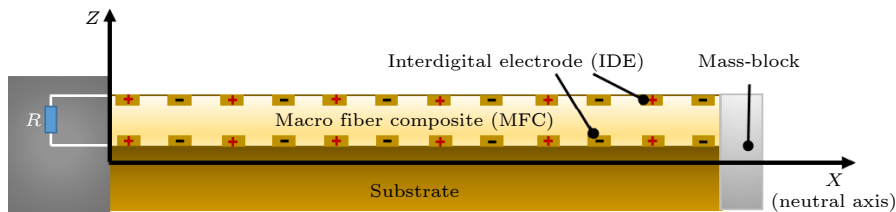


图 2 MFC 理论分析建模图

Fig. 2. MFC Model diagram of theoretical analysis.

式中, $w_{\text{rel}}(x, t)$ 为梁中性轴相对于固定参考系的横向位移, $S_3(x, z, t)$ 为 X 方向的应变. 振动控制方程为

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t} \\ & + m \frac{\partial^2 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t^2} = [-m + M_t \delta(x - L)] \\ & \times \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, $M(x, t)$ 为梁内弯矩, $c_s I$ 为结构弹性等效阻尼, c_a 为空气阻尼系数, m 为梁的质量, M_t 为悬臂梁端部用于调节谐振频率的质量块重量, L 为悬臂梁长度. 进一步推导, MFC 传感的耦合力学方程为

$$\begin{aligned} & YI \frac{\partial^4 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t} \\ & + m \frac{\partial^2 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t^2} + KV(t) \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x - L)}{dx} \right] \\ & = [-m + M_t \delta(x - L)] \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (9)$$

其中, YI 为 MFC 悬臂梁的等效刚度, K 为 MFC 的机电耦合系数, $V(t)$ 为 MFC 的输出电压. 根据结构力学, 悬臂梁无阻尼自由振动的控制方程为

$$YI \frac{\partial^4 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^2} + m \frac{\partial^2 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (10)$$

根据模态叠加法, 压电悬臂梁的横向位移为

$$w_{\text{rel}}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(x), \quad (11)$$

代入边界条件可以求出 R 阶模态固有频率:

$$w_r = \lambda_r^2 \sqrt{YVL^4 n} \quad (12)$$

可以求出模态力系数

$$f(r) = - \left[m \int_0^L \phi_r(x) d(x) + Mt \phi_r(L) \right], \quad (13)$$

其中 $\phi_r(x)$ 为 r 阶模态函数.

则输出电压峰值为

$$V_0 = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{K}{C_p} \frac{j m \omega^3 f_r \omega_0}{\omega_r^2 + \omega^2 + 2j \xi \omega_r \omega}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{K}{C_p} \frac{j \omega K}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j \xi \omega_r \omega} + \frac{1}{RC_p} + j \omega}. \quad (14)$$

可以推导出 MFC 传感电压表达式:

$$V(t) = V_0 e^{j\omega t}. \quad (15)$$

可见, 基于直接模型法和混合模型法进行建模后, 结合模态控制方程对 MFC 整体结构和 MFC 悬臂梁结构进行分析, 可以避免代表性体积元预估参数的误差, 更精确地推导出 MFC 的电输出性能.

2.2 有限元仿真模型

本工作分别建立了代表性体积元模型、直接模型和混合模型, 分别从细节到整体, 从微观到宏观对 MFC 的有限元模型进行了建模和分析. 等效体积元模型虽然计算的精确度不高, 但是可以通过对细节的分析, 看出电场和应力的分布趋势. 直接模型建模的 MFC 和混合模型建模的 MFC 悬臂梁可以从整体角度分析, 获得 MFC 的电学输出结果.

建立 MFC 的代表性体积元模型, 选取一个包含“正-负”叉指电极、压电纤维条和环氧树脂条的单元进行建模, MFC 的有限元建模如图 3(a) 所示. 在建立 MFC 有限元几何模型时, 涉及的几个重要尺寸参数及其初始值如表 1 所示.

仿真计算中还涉及压电陶瓷、环氧树脂和叉指铜电极等材料参数, 需要设置压电陶瓷的压电常数矩阵、柔度矩阵、相对介电常数矩阵和密度, 设置环氧树脂和铜电极材料的密度、泊松比、杨氏模量及相对介电常数. 本工作使用压电陶瓷 PZT-5H 作为功能相材料, 选取的压电陶瓷 PZT-5H 为课题组制备的压电陶瓷材料, 通过制备符合国标的压电片

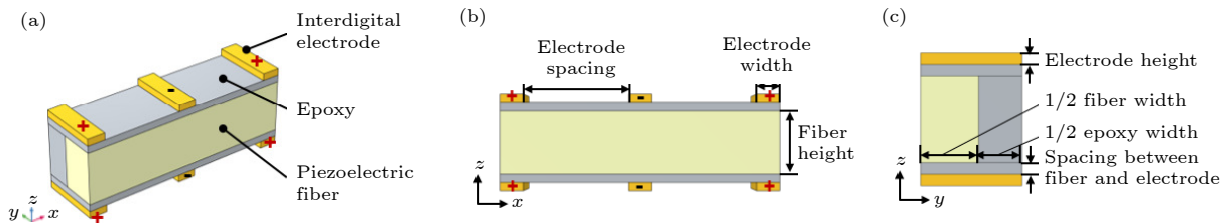


图 3 MFC 的代表性体积元建模 (a) RVE 模型; (b) RVE 模型的尺寸参数

Fig. 3. Representative volume element modeling of MFC: (a) RVE modeling diagram; (b) dimension parameter of RVE.

表 1 MFC 代表性体积元模型尺寸参数
Table 1. Dimension parameter of RVE of MFC.

建模参数	纤维宽度	纤维高度	环氧宽度	环氧高度	电极宽度	电极高度	电极间距	纤维电极间距
定义符号	W_f	H_f	W_e	H_e	W_i	H_i	S_i	S_f
初始值/mm	0.35	0.45	0.3	0.45	0.1	0.04	0.5	0.04

表 2 压电陶瓷的材料参数
Table 2. Material parameters of piezoelectric ceramic.

密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	压电常数/($10^{-12} \text{ C}\cdot\text{N}^{-1}$)			介电常数			柔度矩阵/($10^{-12} \text{ m}^2\cdot\text{N}^{-1}$)				
ρ	d_{33}	d_{31}	d_{15}	ϵ_{11}	ϵ_{33}	s_{11}	s_{12}	s_{13}	s_{33}	s_{44}	s_{66}
7750	593	-274	741	3130	3400	16.5	-4.8	-8.5	20.7	43.5	42.6

后, 测试出 PZT-5H 的材料参数如表 2 所示. 环氧树脂和铜电极为各向同性材料, 根据制造商提供的数据, 其材料参数如表 3 所示.

表 3 环氧树脂和叉指电极的材料参数
Table 3. Material parameters of epoxy resin and interdigital electrode.

材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	相对介电常数
铜电极	8960	120	0.34	—
环氧树脂	1960	1	0.38	4

使用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 进行 RVE 建模分析, 图 4 为计算后生成的电场分布图, 可以看出 MFC 内部的电场分布是非均匀的. 在叉指电极下端存在电场极小的“电场死区”; 靠近叉指电极区域的非均匀称之为“过渡区”; 在两个叉指电极的中间间距处存在“电场活化区”, 此处的电场分布均匀, 是对压电纤维产生电致伸缩贡献最大的电场区域. 根据建模也可以推断出 MFC 内部的电场是均匀分布和非均匀分布共存的, 对 MFC 使役动作影响最大的是电场活化区的压电陶瓷纤维.

RVE 建模可以灵活变换代表性体积元的尺寸参数和材料参数, 较好地表征 MFC 的电场分布和应力分布的细节变化, 但是对于 MFC 整体的电场、应力和应变无法精确仿真. 根据 MFC 的实体结构对 MFC 的直接模型和混合模型进行建模, 如图 5 所示.

图 5(a) 所示的直接模型是对 MFC 的所有实体结构进行建模, 图 5(b) 所示的混合模型是在直接模型的基础上加入了悬臂梁基底, 对 MFC 悬臂梁传感器进行建模. 在研究传感特性时, 一方面

对 MFC 悬臂梁混合模型沿纵向一端固定, 另一端施加加速度体载荷, 分析其叉指电极两端的电压特性及其谐振特性, 分析 MFC 的输出电压与尺寸参数之间的关系, 即研究 MFC 共振式传感器; 另一方面对 MFC 的悬臂梁整体底面进行固定约束, 并在垂直于材料平面方向施加振动载荷信号, 即研究 MFC 贴片式传感器.

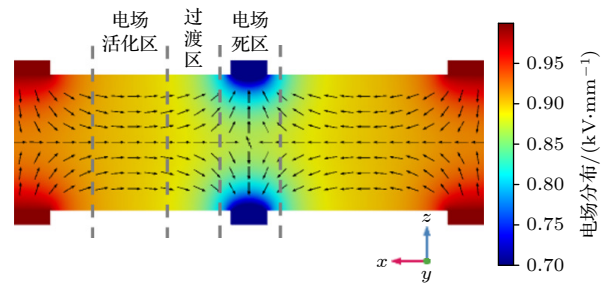


图 4 MFC 的电场分布图
Fig. 4. Electric field distribution of MFC.

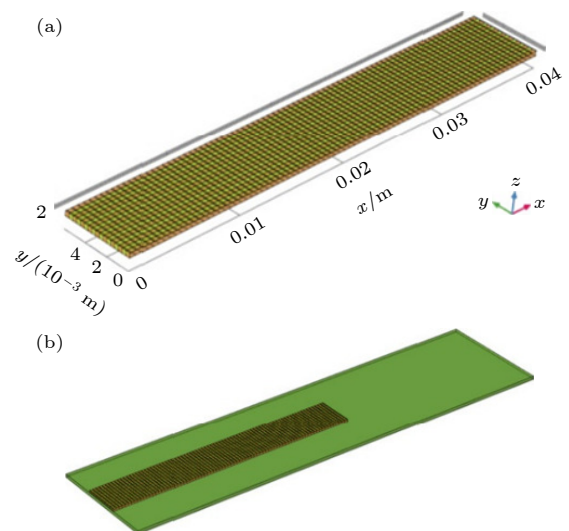


图 5 (a) MFC 的直接模型; (b) MFC 的混合模型
Fig. 5. (a) Direct model of MFC; (b) mixed model of MFC.

3 MFC 传感器性能预测

MFC 传感器是 MFC 与板或梁等薄壁结构组成的复合材料器件. MFC 与不同尺寸参数和材料参数的基板复合后, 其谐振频率和输出特性差异很大, 为了深入研究 MFC 复合材料的性能, 将 MFC 与铝基板复合成悬臂梁器件, 使用有限元分析探讨了 MFC 传感器的性能. MFC 在压电传感时有贴片式传感和共振式传感两种传感模式, 如图 6 所示, 两种传感器的激振受力方式不同, MFC 贴片式传感器的上表面呈自由状态, 下表面受垂直作用力, 传感出的下表面受激振动信号. MFC 共振式传感器, 是激振力从基板一端传出, MFC 通过与基板同频共振的方式, 传感激振力信号. 对于 MFC 的两种传感器利用有限元仿真分析并预测了传感性能. 当 MFC 作为贴片式传感器器件时, MFC 下方固定于需要传感的材料上, 通过感知材料的下表面载荷实现力电耦合, 进而将下表面载荷信号转换成电信号进行传感. MFC 共振式传感器适用于薄壁材料, MFC 传感器设计粘贴于悬臂梁上, 悬臂梁的前端作为固定端、末端作为自由端, 通过与薄壁材料上的载荷信号发生共振而实现振动信号的传感. 因此, 下文将分别从贴片式传感器和共振式传感器两个方面来做预测 MFC 传感器器件的性能.

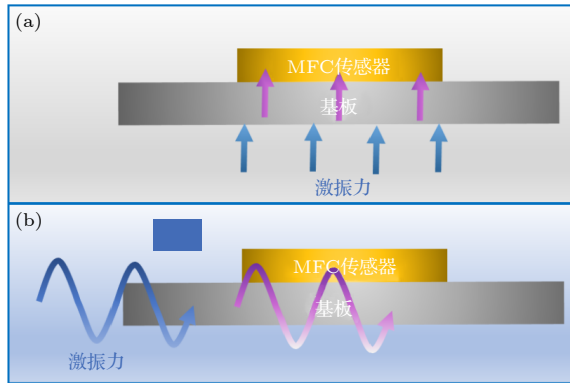


图 6 MFC 传感器 (a) 贴片式传感器; (b) 共振式传感器
Fig. 6. MFC sensor: (a) MFC patch sensor; (b) MFC resonance sensor.

3.1 MFC 贴片式传感器性能预测

选用相同尺寸的 MFC 模型粘贴在铝制基板上进行仿真建模. 此时 MFC 作为贴片式传感器, 其主要作用是将振动所产生的应力载荷信号转换成电信号. MFC 贴片式传感器的边界条件设置时,

在悬臂梁下表面设置固定边界条件, 对 MFC 悬臂梁输入不同加速度的信号 MFC 贴片式传感器的性能预测分析结果如图 7 所示. 可见, MFC 传感器器件以贴片方式固定后, 输入的加速度载荷越大, MFC 的响应电信号越大, MFC 的传感输出电信号与输入的加速度载荷信号正相关. 根据不同加速度的电响应信号可以看出, 在加速度固定时, 在 200 Hz 频率范围内随着频率的增大, 输出的电信号稳定不变. 可见, 这种传感器输出电压与表面载荷存在线性对应关系. 但是, 由仿真结果也可以看出, 这种测试方式也存在一定的弊端, 即输出的终端电压较小. 在输入的加速度载荷小于 10 m/s^2 时, 输出的电压信号小于 1 mV , 这主要是因为贴片式传感器只有下表面接触振动材料, 无法有效传递应力或共振信号. 器件对 MFC 元件的灵敏度要求较高, 对测试仪器精度要求也较高, 实现起来较困难, 因此, 我们又进一步分析了共振式 MFC 传感器.

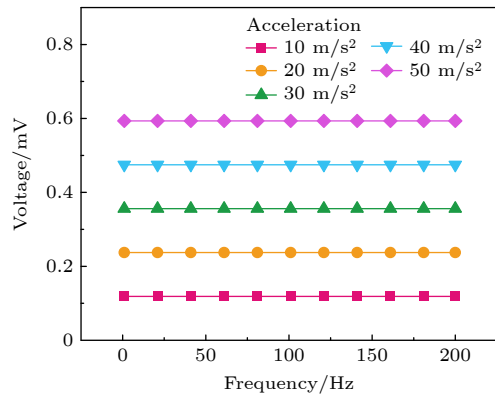


图 7 MFC 贴片式传感器传感效果

Fig. 7. Sensing performance of MFC patch sensor.

3.2 MFC 共振式传感性能预测

共振式 MFC 传感器采用悬臂梁的方式组装 MFC 和悬臂梁基板, 将 MFC 悬臂梁器件一端固定于振动源上, 另一端呈现自由端状态, 当模块振动时带动悬臂梁引起共振, 此时载荷信号通过共振的方式传递到悬臂梁基板上, 悬臂梁上的 MFC 感知共振信号, 并将其转换成电信号输出.

在研究中发现, 基板的宽度对 MFC 共振式传感器的谐振频率和输出电压影响不大. 由于工程应用中铝基板材料大多使用 0.5 mm 厚度. 因此, 在探究共振式传感器的性能时, 使用铝基板厚度为 0.5 mm 、宽度为 15 mm . 将 MFC 与铝板用布尔运算粘贴装配后构成悬臂梁振子, 一端施加固定约束

边界条件, 另一端为自由端, 整体施加 10—50 m/s^2 的体载荷加速度, 分别计算了铝基板长度对 MFC 传感器的性能影响, 如图 8 所示.

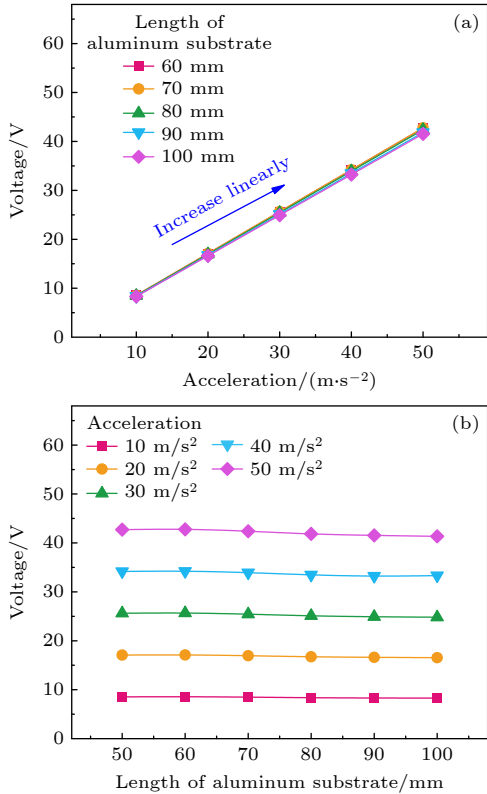


图 8 MFC 共振传感器的传感性能 (a) 加速度载荷对输出电压的影响; (b) 基板长度对输出电压的影响
Fig. 8. Sensing performance of MFC resonant sensor: (a) Influence of acceleration load on output voltage; (b) influence of substrate length on output voltage.

图 8(a) 为不同长度铝基板的 MFC 稳态仿真电压特性曲线, 可以看出, 随着输入体载荷加速度的增大, 共振式 MFC 的输出电压逐渐增大, 铝基板长度对 MFC 的输出电压影响很小, 不同长度下的 MFC 其电压响应基本相同. 图 8(b) 为输入不同体载荷加速度时的 MFC 稳态仿真电压特性曲线, 可以看出, 随着激振加速度从 10 m/s^2 逐渐增至 50 m/s^2 , 共振式 MFC 传感器的输出电压响应从 8.52 V 增至 42.40 V.

图 9 为铝基板长度对 MFC 共振式传感器的频率和电压的影响. 可以看出, 在加载 5 m/s^2 的加速度时, 随着基板长度的增大, MFC 传感器的谐振频率非线性下降. 当基板长度为 60 mm 时, MFC 共振式传感器的谐振频率为 104 Hz, 传感电压为 4.18 V; 当基板长度为 80 mm 时, MFC 共振式传感器的谐振频率为 67 Hz, 传感电压为 4.17 V. 可

见, 加载的激振加速度大小对谐振频率没有影响, 但是会影响输出电压线性变化.

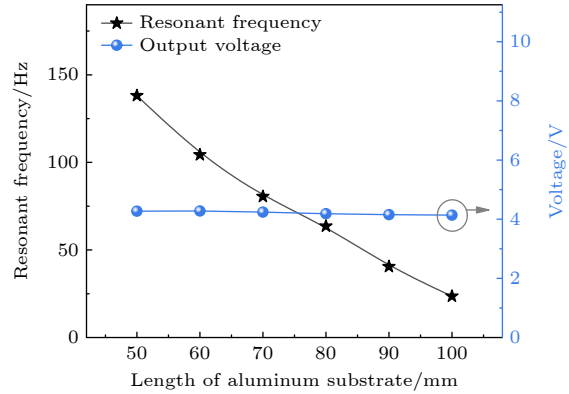


图 9 MFC 共振式传感器的频率和电压变化
Fig. 9. Frequency and voltage variation of MFC resonant sensor.

仿真计算的结果预测了 MFC 传感器性能, 为 MFC 的结构调控和参数设计提供了参考. 与贴片式 MFC 传感器件相比, 共振式 MFC 传感器的输出电压更高, 传感信号更灵敏, 且信号识别率比贴片式 MFC 传感器件更高, 因此本文中后续实验使用的传感器采用共振式 MFC 传感器.

4 实验结果与讨论

使用激振台 (苏州苏试有限公司, 型号 DC-1000-15) 加载不同的加速度驱动条件, 模拟薄壁材料的低频噪声振动环境, 搭建 MFC 传感器进行传感性能的测试. 基于前期的有限元分析结果, 铝悬臂梁基板尺寸为 80 mm \times 15 mm \times 0.5 mm. 图 10(a) 所示为 PZT-5H 基 MFC 传感器的频率响应特性曲线, 可以看出, 当施加频率为 1 Hz、加速度为 2 m/s^2 的噪声信号时, MFC 传感器可以有效感知到振动信号的频率, 并且振幅信号明显, 传感器输出的电信号与驱动激励振动同频同振幅. 图 10(b) 所示为不同频率振动激励下, MFC 传感器对加速度信号的响应. 可以看出, 在 1—200 Hz 频率范围振动时, MFC 均具有明显的电压输出, 说明此 MFC 传感器对于 1—200 Hz 频率范围的振动都可以实现较好的传感检测. 不同频率对应的 MFC 输出电压不同, 在 50—74 Hz 频率范围振动时 MFC 传感器输出电压最大, 说明 MFC 在这个频率范围的振动可以与悬臂梁基板产生共振. 可见, MFC 传感器不仅可以传感频率变化, 也可以

传感电压幅值变化, 随着振动信号激励加速度的增大, MFC 传感器的输出电压线性增大, 可以根据 MFC 的输出电压判断器件的振动强度.

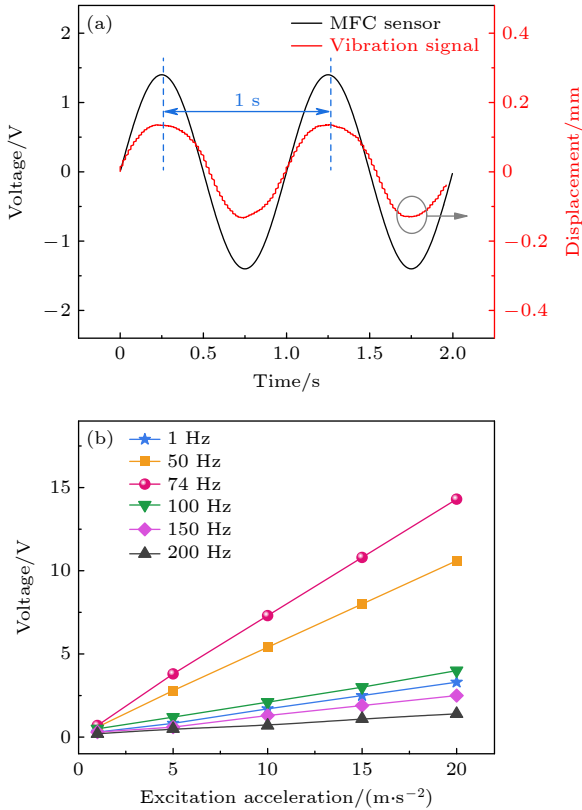


图 10 PZT-5H 基 MFC 传感器性能 (a) 频率响应; (b) 加速度响应
Fig. 10. Performance of the PZT-5H-based MFC sensor: (a) Frequency response; (b) acceleration response.

图 11 为 MFC 传感器的仿真与实验结果对比, 在铝基板上进行振动激励时, 在谐振频率处传感电压最大, MFC 传感器测试的谐振频率为 74 Hz, 输出电压为 3.59 V; 仿真计算的谐振频率为 67 Hz, 输出电压为 4.17 V. 仿真计算结果可以有效预测 MFC 传感器的谐振频率和输出电压, 最大误差不超过 13.9%. 可见, MFC 传感的结构调控和仿真分析可以有效预测 MFC 传感器的传感性能.

将 MFC 传感器的性能参数总结, 如表 4 所示. 可以看出, MFC 作为一种智能传感器件, 具有优异的传感特性, 最高灵敏度为 7.35 V/g, 其工作频段低、灵敏度高、输出电压大, 可以有效检测低频振动信号.

本文提出的 MFC 传感器结构具有普适性, 在进一步的有限元仿真和实验测试中发现, 这些模型可以应用于不同尺寸、不同压电相材料和不同聚合物相材料组成的 MFC 传感器, 且悬臂梁基板不仅

限于铝结构, 还可以适用于钢板、铜板、碳纤维板等各种结构的传感, 为 MFC 传感器的性能预测提供了新方法.

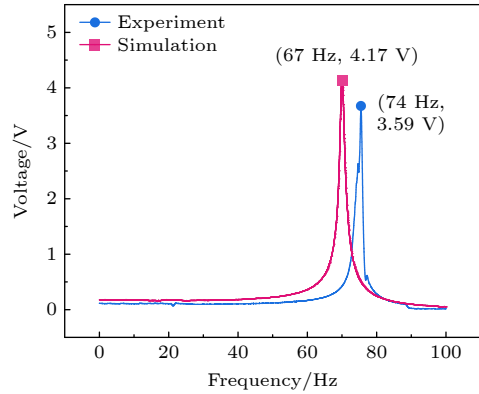


图 11 MFC 传感器仿真与实验结果对比
Fig. 11. Comparison of simulation and experiment results of MFC sensor.

表 4 MFC 传感器性能参数
Table 4. Performance parameters of MFC sensor.

性能参数	单位	数值范围
灵敏度(±5%)	V/g	0.5—7.35
工作频段(±5%)	Hz	1—200
谐振频率	Hz	74
响应时间	ms	<1
输出电压	V	0.5—20

5 结论

本文基于有限元分析方法和压电本构方程, 针对 MFC 传感器的应用需求分别构建了有限元模型, 对 MFC 传感器性能做出预测, 实验结果与预测结果吻合, 得到了以下研究结论.

1) 用有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 分别构建了代表性体积元模型、直接模型和混合模型. 代表性体积元模型可以有效模拟 MFC 的细节变化, 可以清晰地表征 MFC 内部电场的复杂分布情况. 而混合模型为 MFC 传感器有效预测提供了保障. 本文针对不同的分析需求选择了不同的模型.

2) MFC 可以组装成悬臂梁制备成 MFC 传感器, MFC 传感器可分为贴片式传感器和共振式传感器. 仿真结果表明: MFC 共振式传感器性能远高于 MFC 贴片式传感器. MFC 共振传感器可以有效实现力电耦合, 保证传感信号的传输; 随着激励加速度从 10 m/s² 增至 50 m/s², 共振式 MFC 传感器的输出电压响应从 8.52 V 线性增至 42.40 V.

当激振加速度 5 m/s^2 , 悬臂梁基板长度为 80 mm 时, 计算得到的 MFC 传感器的谐振频率为 67 Hz , 输出电压为 4.17 V .

3) 将 MFC 制备成铝基板传感器, MFC 传感器与基板振动具有较好的同频共振特性, 随着驱动激振加速度的增大, MFC 传感器的输出电压线性增大. 在铝基板上进行振动激励, MFC 传感器测试的谐振频率为 74 Hz , 输出电压为 3.59 V ; 仿真计算的谐振频率为 67 Hz , 输出电压为 4.17 V . 仿真计算结果可以有效预测 MFC 传感器的谐振频率的输出电压, 最大误差不超过 13.9% . 此外, 实验结构显示 MFC 悬臂梁在低频工作时具有优异的传感灵敏度, 传感灵敏度为 7.35 V/g .

参考文献

- [1] Hagood N W, Bent A A 1993 *34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference* La Jolla, CA, U.S.A., April 19–22, 1993
- [2] Aaron A B, Nesbitt W H 1997 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **8** 903
- [3] Bent A A, Hagood N W, Rodgers J P 1995 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **6** 338
- [4] Wilkie W K, Bryant R G, High J W, Fox R L, Hellbaum R F 2000 *Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies* Newport Beach, USA, March 7–9, 2000
- [5] Tu J W, Zhang J R, Li Z, Gao K, Liu M Y 2020 *Smart Mater. Struct.* **29** 015038
- [6] Lou J Q, Chen T H, Yang Y L, Xu C, Chen H, Ma J, Cui Y G, Li G 2022 *J. Vib. Control* **28** 290
- [7] Lou J Q, Gu T, Chen T H, Yang Y L, Xu C, Wei Y D, Cui Y G 2022 *Mech. Syst. Signal Process.* **170** 108824
- [8] Zhou J J, Zhou J, Chen W, Tian J, Shen J, Zhang P C 2022 *Compos. Struct.* **299** 116019
- [9] Wang X Y, Yuan X, Wu M L, Gao F, Yan X M, Zhou K C, Zhang D 2019 *Sensors* **19** 1809
- [10] Yan M Y, Yuan X, Zhang Y, Zhang S F, Wang X Y, Gao F, Zhou K C, Zhang D 2019 *Smart Mater. Struct.* **28** 125015
- [11] Yuan X, Wang X Y, Yan M Y, Gao F, Zhang S F, Zhou K C, Ji X B, Zhang D 2020 *Measurement* **154** 107500
- [12] Zhou J J, Zhou J, Yu Y Y, Shen J, Zhang P C, Chen W 2023 *Ceram. Intl.* **49** 32528
- [13] Huang R, Zhou J J, Shen J, Tian J, Zhou J, Chen W 2024 *Materials* **17** 3033
- [14] Discalea F L, Matt H, Bartoli I, Stefano C, Gyuhae P, Charles F 2006 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **18** 373
- [15] Konka H P, Wahaba M A, Lian K 2013 *Sens. Actuators A* **194** 84
- [16] Pearson M R, Eaton M J, Featherston C A, Holford K M, Pullin R 2011 *J. Phys.: Conf. Ser.* **305** 12049
- [17] Grzybek D, Micek P 2017 *Sens. Actuators A* **267** 417
- [18] Micek P, Grzybek D 2019 *Sens. Actuators A* **301** 111744
- [19] El Najjar J, Mustapha S 2020 *J. Civ. Struct. Health Monit.* **10** 793
- [20] Glouia Y, Chaabouni Y, El Oudiani A, Maatoug I, Msahli S 2019 *Intl. J. Adv. Manuf. Tech.* **103** 4671
- [21] Malekimoghdam R, Icardi U 2019 *Composites Part B* **177** 107405
- [22] Marino M, Wriggers P 2019 *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* **344** 938
- [23] Yu S, Zhang D T, Qian K 2019 *Appl. Composite Mater.* **26** 65
- [24] Zahid M, Sharma R, Bhagat A R, Abbas S, Kumar A, Mahajan P 2019 *Composite Struct.* **226** 111221

Finite element prediction and device performance of piezoelectric fiber composite based smart sensor*

GAO Yukun¹⁾ ZHAO Jie¹⁾ ZHOU Jingjing^{2)†} ZHOU Jing^{3)4)‡}

1) (Qingdao Cixing New Material Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

2) (Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Informatics of Anhui Education Institutes, Fuyang Normal University, Fuyang 236000, China)

3) (School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China)

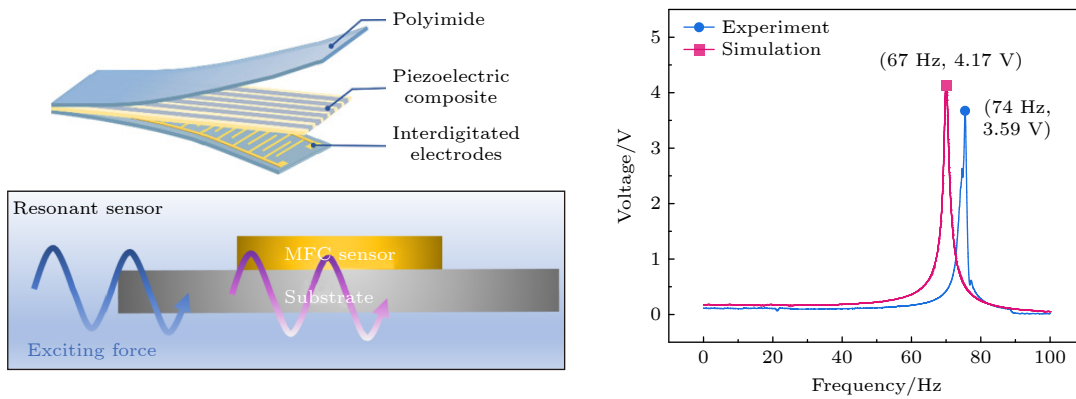
4) (Sanya Science and Education Innovation Park, Wuhan University of Technology, Sanya 572024, China)

(Received 30 September 2024; revised manuscript received 30 November 2024)

Abstract

Macro fiber composite (MFC) is extensively utilized in aviation, aerospace, civilian, and military domains due to its high piezoelectricity, flexibility, and minimal loss. Nevertheless, existing research on MFC sensors has focused on material applications, with a conspicuous lack of systematic investigation into the simulation and modeling of MFC sensor devices. In this study, three models, namely, a representative volume element (RVE) model, a direct model, and a Hybrid model are established to analyze the finite element models of MFC, covering the scales from micro to macro. On the one hand, the equivalent RVE model contributes to an

understanding of the internal electric field distribution in MFC, thereby establishing a theoretical foundation for force-electric coupling. On the other hand, the application of the direct model and hybrid model accords with the boundary conditions in MFC applications, which lays a theoretical foundation for the stress sensing and resonance sensing mechanisms of MFC. These models constitute effective tools for predicting the sensing performance of MFC smart element sensors. The simulation outcomes indicate that resonant sensors exhibit significantly superior performance compared with patch sensors. Under the conditions where the excitation acceleration is 5 m/s^2 and the cantilever substrate length is 80 mm, the simulated resonant frequency of the MFC resonant sensor is 67 Hz, with an output voltage of 4.17 V. Experimental results confirm these findings. It is reported that the resonant frequency is 74 Hz and the output voltage is 3.59 V for the MFC sensor. The remarkable consistency between the simulation results and experimental data of the MFC sensor deserves to be emphasized. In addition, the MFC sensor shows excellent sensing sensitivity at low frequencies, with a sensitivity of 7.35 V/g. Obviously, MFC shows remarkable sensing characteristics at low-frequency resonance. The three finite element models established in this work can well predict the sensing performance of MFC sensors, thus ensuring reliable prediction of the performance of such sensors.



Keywords: macro fiber composites (MFC), sensors, performance prediction, finite element model

PACS: 77.84.Lf, 07.07.Df

DOI: 10.7498/aps.74.20241379

CSTR: 32037.14.aps.74.20241379

* Project supported by the Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Informatics of Anhui Education Institutes Open Program, China (Grant No. FMDI202407), the Key Program of Fuyang Normal University Youth Talent Fund, China (Grant No. rcxm202402), and the Natural Science Foundation Innovation Research Team of Hainan Province, China (Grant No. 524CXTD431).

† Corresponding author. E-mail: 202401001@fynu.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: zhoujing@whut.edu.cn



压电纤维复合材料智能传感器的有限元预测与器件性能

高裕昆 赵洁 周晶晶 周静

Finite element prediction and device performance of piezoelectric fiber composite based smart sensor

GAO Yukun ZHAO Jie ZHOU Jingjing ZHOU Jing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 057701 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241379

CSTR: 32037.14.aps.74.20241379

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241379>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多模态混合输入模拟实验过程实现新型Al-Si-Mg系合金设计

Design of new Al-Si-Mg alloys by multi-modal mixed input simulation experiment

物理学报. 2023, 72(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221736>

应用于感存算一体化系统的多模调控忆阻器

Multimode modulated memristors for in-sensor computing system

物理学报. 2022, 71(14): 148502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220226>

基于表面等离子体共振的新型超宽带微结构光纤传感器研究

A new type of ultra-broadband microstructured fiber sensor based on surface plasmon resonance

物理学报. 2021, 70(7): 074207 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201477>

双频带太赫兹超材料吸波体传感器传感特性

Sensing characteristics of dual band terahertz metamaterial absorber sensor

物理学报. 2021, 70(16): 168101 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210062>

极化中子散射零磁场屏蔽体的有限元分析

Finite element analysis of zero magnetic field shielding for polarized neutron scattering

物理学报. 2023, 72(14): 142801 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230559>

高温压电振动传感器及其压电材料研究进展

Research progress of high-temperature piezoelectric vibration sensors and piezoelectric materials

物理学报. 2025, 74(2): 027702 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20240906>