

基于有限元预测的宏观纤维复合物低频微振动能量收集参数优化*

徐飞跃¹⁾ 周晶晶^{1)†} 周静^{2)3)‡} 武山¹⁾ 朱勇¹⁾ 张磊¹⁾

1) (阜阳师范大学, 信息功能材料结构与器件安徽普通高校重点实验室, 阜阳 236037)

2) (武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070)

3) (武汉理工大学, 三亚科教创新园, 三亚 572024)

(2026年1月7日收到; 2026年2月2日收到修改稿)

物联网分布式传感节点对低频微振动能量收集提出了高效率、高适应性的机电转换需求. 宏观纤维复合物兼具高压电系数与良好柔韧性, 是捕获此类能量的理想材料, 但其内部电场非均匀分布和关键参数影响不明制约了其性能发挥. 为此, 本文提出一种基于多尺度有限元仿真预测与实验验证的参数优化方法. 通过建立代表性体积元模型, 揭示内部电场非均匀特征及“电场活化区”的关键作用; 构建悬臂梁整体三维模型, 系统地分析纤维宽度与高度对应力及电势的影响. 仿真预测表明, 当纤维尺寸为 60 mm (长)×0.35 mm (宽)×0.35 mm (高) 时, 器件输出电压高且应力集中最小. 依据此优化结果制备的宏观纤维复合物悬臂梁器件, 在 8.9 Hz 谐振频率、0.5g 加速度激励下, 实测开路电压达 43 V, 匹配 2.5 MΩ 负载时峰值功率密度为 0.31 mW/cm². 仿真与实验结果吻合良好, 谐振频率误差仅为 1.1%. 本研究明确了宏观纤维复合物用于低频微振动收集的最优尺寸, 为高性能、可定制能量收集器设计提供了有效方法.

关键词: 宏观纤维复合物, 有限元分析, 能量收集, 低频振动

DOI: 10.7498/aps.75.20260033

CSTR: 32037.14.aps.75.20260033

1 引言

物联网与分布式传感技术的迅猛发展, 对长期、自供能的微功率电源提出了迫切需求^[1]. 环境中广泛存在的低频 (≤ 10 Hz)、微幅机械振动能作为一种分布式的可再生能源, 其有效利用受到持续关注^[2,3]. 压电能量俘获技术凭借结构简单、无电磁干扰、易于微型化集成等优势, 为此类振动能-电能转换提供了有效途径. 然而, 振动能采集面临的核心挑战在于: 低频微振动下压电元件应变不足, 微

幅激励时能量转换效率受限, 导致传统压电俘能器难以实现高效机电耦合. 相较于太阳能、潮汐能等集中式能源, 振动能虽分布广泛但能量密度低, 且自然环境中的振动普遍具有频率低 (≤ 10 Hz)、振幅小、随机性强的特征, 这对俘能器的宽频响应与能量俘获效能提出了更高要求.

针对上述挑战, 现有研究主要从结构创新与材料改性两个层面展开. 在结构优化方面, 研究者通过设计非线性磁力耦合、多模态谐振、变截面梁^[4-8]等构型以拓宽频带、降低谐振频率. 例如, Fan 等^[9]利用钟摆结构的低频振动冲击驱动压电能量采集

* 安徽省大学生创新创业训练计划项目 (批准号: S202410371050)、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暨物理学校级一流特色学科子项目 (批准号: 24YLTS05-2505) 和阜阳师范大学青年人才基金重点项目 (批准号: rcxm202402) 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

器,其能量收集频率在 10 Hz 左右时,输出电压峰值达到 30.1 V,但功率水平仍较低.为了进一步匹配微振动环境实现能量收集,科学工作者进一步对器件结构进行改造.如: Ibrahim 等^[10]提出振动能量收集要关注收集器的几何结构.随后, Wang 等^[11]则通过优化锥形梁结构(尖端宽 25 mm,固定端宽 45 mm),将输出电压相较于矩形梁提高了 58.30%.

在材料体系方面,传统压电陶瓷(如 PZT)虽具有高压电系数,但脆性大、难以适应弯曲变形;压电聚合物(如 PVDF)柔韧性好,但其压电活性相对较低.为兼顾高压电性与良好韧性,美国航天局 NASA 提出了宏观纤维复合物(macro fiber composite, MFC),它是由压电陶瓷纤维与连续相聚合物基体复合而成^[12-16],既保留了原有压电材料高灵敏度、高活性的优点,又改善了压电陶瓷脆性大、柔软性差的缺点,通过结构设计可以制备出结构与性能定制化的宏观纤维复合物,满足不同领域对压电材料的应用^[17-21]需求.目前, MFC 广泛应用于能量采集、结构驱动、振动控制、结构健康监测和传感器^[22-26]等方面.近期研究表明, MFC 在微振动能量收集中具有显著优势.例如, Wakshume 和 Placzek^[27]指出 MFC 构型优化可显著提升机电耦合效率. Liu 等^[28]阐明了纤维-基体界面耦合与极化均匀性的动态关联机制,为 MFC 俘能器设计提供了理论支撑. Gao 等^[29]使用 MFC 从沼液中富集耐盐碱微生物来收集能量,进一步将 MFC 用于复杂流体环境能量采集,拓展了其应用边界.

尽管如此,将宏观纤维复合物用于低频微幅振动能量收集,仍存在两个关键科学问题亟待解决:其一,材料非均匀性导致内部电场呈非线性分布,传统均匀场理论模型难以准确地预测其力电耦合行为;其二,纤维取向、体积分数等微结构参数与宏观俘能性能的定量关系尚不明确,缺乏系统的参数调控方法.现有研究多依赖于试错实验,在宏观纤维复合物微结构设计与性能预测方面尚未形成完善的理论体系.

针对上述问题,本文提出了一种融合多尺度有限元仿真与实验验证的宏观纤维复合物能量收集器参数优化方法.通过建立代表性体积元模型,揭示了宏观纤维复合物内部电场的非均匀分布规律;进而构建悬臂梁能量收集器的三维整体有限元模

型,系统地研究了关键几何参数(纤维宽度与高度)对应力分布与电势输出的影响机制,实现了从材料微结构到器件宏观性能的关联预测.最终,依据仿真优化结果制备器件并进行实验测试,验证了预测模型的准确性.本研究不仅为面向低频微振动能量收集的宏观纤维复合物器件提供了明确的参数优化方案,更构建了“微结构设计-多物理场耦合仿真-实验验证”的完整研究框架,为压电复合材料在分布式微能源领域的应用奠定了方法基础.

2 理论模型与仿真分析

2.1 MFC 的结构与工作原理

宏观纤维复合物是一种三明治结构的材料,功能相复合层是压电陶瓷纤维和环氧树脂构成的 2-2 型复合材料,上下覆盖交叉指电极,最后使用聚酰亚胺(PI)进行封装(如图 1(a)所示).其标准制备流程通常包括:首先,将压电陶瓷(锆钛酸铅 PZT-5H)加工成毫米级长条状纤维,将其定向排列并采用环氧树脂黏合,形成压电纤维/环氧树脂功能层;随后,在该功能层的上下表面通过磁控溅射等工艺覆盖交叉指电极(IDE),其内部引出电信号;最后,在整体结构的顶部和底部覆以柔性的聚酰亚胺(PI)薄膜作为绝缘封装与基底.

图 1(b)为本文测试所用 MFC 实物图,可以看出我们所制备的 MFC 具有良好的柔韧性,交替复合的压电相和聚合物相为 MFC 赋予了高压电性和柔韧性,从而实现更高的电输出性能.图 1(c)为 MFC 的 d_{33} 型工作模式, d_{33} 型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,具有优异的驱动性和电输出性. d_{33} 型 MFC 是目前应用最多的一种工作模式,在航空航天等多个领域被广泛使用,也是本文选取的 MFC 工作模式.

当对宏观纤维复合物施加机械应力时,材料内部电畴发生定向排列,并在上下电极表面感应出异性电荷,如图 1(d)所示,从而实现机械能至电能的转换.然而,由于其结构复杂性,其力-电耦合行为的理论分析颇具挑战.

2.2 MFC 悬臂梁能量收集理论分析

MFC 俘能器主要结构可分为三层,分别为等

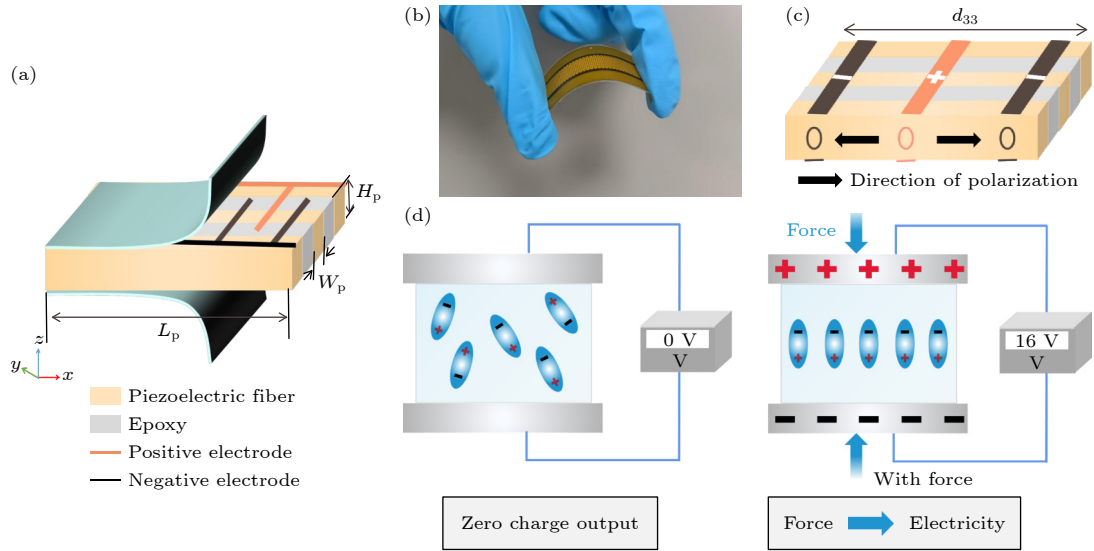


图 1 宏观纤维复合物及其机电耦合机理图 (a) 宏观纤维复合物 (MFC) 的结构示意图; (b) MFC 实物图; (c) MFC 工作模式; (d) MFC 力电耦合原理图

Fig. 1. Macro fiber composite and electromechanical coupling mechanism: (a) Structure of macro fiber composite (MFC); (b) physical diagram of MFC; (c) working mode of MFC; (d) the principle of MFC electro-mechanical coupling.

效压电层、基板层和聚酰亚胺 (PI)-电极层, 各层的本构方程如下:

$$T_3^{\text{eq}} = Y^{\text{eq}} S_3 - e_3^{\text{eq}} E_3, T_3^{\text{e}} = Y^{\text{e}} S_3, T_3^{\text{k}} = Y^{\text{k}} S_3, \quad (1)$$

式中, 上标 eq 表示等效压电层; e 表示弹性基板层; k 表示 PI-电极层; S 及 T 表示应变和应力; Y^{eq} , Y^{e} 和 Y^{k} 分别表示等效压电层、基板层和 PI-电极层的杨氏模量。

根据 Euler-Bernoulli 理论, 忽略了剪切变形和旋转惯性效应。层合梁轴向应变与曲率半径的关系为

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

其中 $w_{\text{rel}}(x, t)$ 为梁中性轴相对于固定参考系的横向位移。对于带端部质量块的微幅弯曲振动和线性化压电效应的 MFC 悬臂梁, 其振动控制方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} + c_s I \frac{\partial^5 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial x^4 \partial t} + c_a \frac{\partial w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t} \\ + m \frac{\partial^2 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t^2} = [-m + M_t \delta(x - L)] \frac{\partial^2 w_b(x, t)}{\partial t^2} \\ - c_a \frac{\partial w_b(x, t)}{\partial t}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $M(x, t)$ 为梁内部弯矩; m 为梁的单位长度质量; $c_s I$ 是表示结构黏弹性的等效阻尼项 (c_s 为等效应变率阻尼系数, I 为悬臂梁横截面等效面积惯性矩); c_a 为黏性空气阻尼系数; M_t 为端部质量块重量; L 为梁长, 进一步推导得到 MFC 传感的

耦合力学方程为^[30]

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

悬臂梁无阻尼自由振动的控制方程为

$$YI \frac{\partial^4 M(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 w_{\text{rel}}(x, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (5)$$

根据模态叠加法, 压电悬臂梁的相对横向位移, $w_{\text{rel}}(x, t)$ 可用一系列特征函数表示:

$$w_{\text{rel}}(x, t) = \sum_{r=1}^{\infty} \phi_r(x) \eta_r(x), \quad (6)$$

式中, ϕ_r 为质量归一化的第 r 阶模态函数; $\eta_r(x)$ 为第 r 阶模态坐标, 而末端带质量块的悬臂梁固定端和自由端的边界条件为

$$\begin{cases} w(0) = 0, \\ YI w''(x)|_{x=L} = w^2 I_t^2 w'(x)|_{x=L}, \\ w'(x)|_{x=0} = 0, \\ YI w'''(x)|_{x=L} = -w^2 M_t w(L). \end{cases} \quad (7)$$

代入边界条件可以求出 R 阶模态固有频率:

$$\omega_r = \lambda_r^2 \sqrt{YI/L^4 n}. \quad (8)$$

考虑振型正交性和 Dirac 函数积分性质, 可得到由模态坐标表示的俘能器振动控制和电学输出微分方程为

$$\frac{d^2\eta_r(t)}{dt^2} + 2\xi_r\omega_r \frac{d\eta_r(t)}{dt} + \omega_r\eta_r(t) + kV(t) = N_r(t), \quad (9)$$

$$\frac{V(t)}{RC_p} + \frac{dV(t)}{dt} + \sum_{r=1}^{\infty} \frac{k}{C_p} \frac{d\eta_r(t)}{dt} = 0, \quad (10)$$

式中, k 是模态力电耦合系数; ξ_r 为模态阻尼比, 表示如下:

$$k = K \left. \frac{d\phi_r(x)}{dx} \right|_{x=L}, \quad \xi_r = \frac{c_s I \omega_r}{2YI} + \frac{c_a}{2m\omega_r}. \quad (11)$$

一般来说模态阻尼比 ξ_r 可通过实验测得, 而不需要得到结构黏弹性的等效阻尼项 $c_s I$ 与空气阻尼值系数 c_a . $N_r(t)$ 为模态力, 当忽略空气阻尼影响时, $f(r)$ 为模态力系数表示如下:

$$f(r) = - \left[m \int_0^L \phi_r(x) \mathbf{d}(x) + M_1 \phi_r(L) \right]. \quad (12)$$

对于 MFC 悬臂梁俘能器来说, 如果其固定端基础部分的位移激励为简谐波形式, 即 $w_b(x, t) = (W_0 + x\theta_0) e^{j\omega t}$ (W_0 和 θ_0 分别为平动和转动位移的幅值, $j = \sqrt{-1}$ 为单位虚数, ω 为谐波激励的圆频率), 由于假设的机电耦合系统为线性系统, MFC 悬臂梁俘能器的电学响应也应该为相同频率的谐波形式, 即电压响应为 $V(t) = V_0 e^{j\omega t}$ (V_0 为输出电压的幅值), 忽略转动位移, 这样谐波激励下稳态解变为

$$\eta_r(t) = \frac{(m\omega^2 f_r W_0 - kV_0) e^{j\omega t}}{\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega}. \quad (13)$$

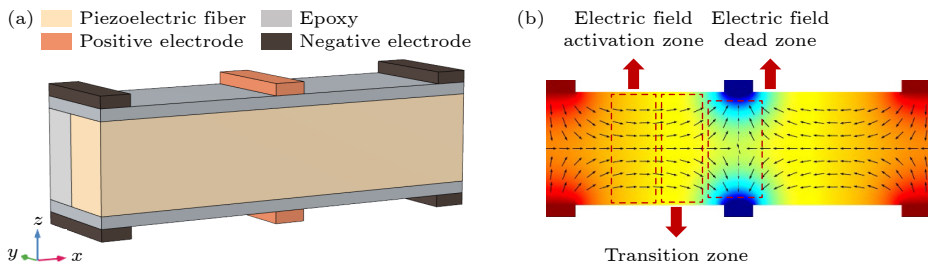


图 2 MFC 的等效体积元 (RVE) 模型 (a) MFC 的 RVE 模型; (b) MFC 的电场分布图

Fig. 2. Representative volume element (RVE) modeling of MFC: (a) RVE modeling of MFC; (b) electric field distribution of MFC.

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	纤维长度	纤维宽度	纤维高度	环氧宽度	电极宽度	电极高度	电极间距	纤维电极间距
定义符号	L_p	W_p	H_p	W_e	W_i	H_i	S_i	S_f
初始值/mm	60	0.35	0.35	0.3	0.1	0.04	0.5	0.04

将 (13) 式及 $V(t) = V_0 e^{j\omega t}$ 代入 (10) 式可得到输出电压幅值 V_0 为^[31]

$$V_0 = \frac{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{k}{C_p} \frac{j m \omega^3 k W_0}{(\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega)}}{\sum_{r=1}^{\infty} \frac{k}{C_p} \frac{j \omega k}{(\omega_r^2 - \omega^2 + 2j\xi_r\omega_r\omega)} + j\omega + \frac{1}{RC_p}}. \quad (14)$$

2.3 多尺度有限元仿真分析

为建立宏观纤维复合物微结构参数与宏观器件性能之间的定量关联, 本文采用 COMSOL Multiphysics 软件进行了多尺度有限元分析. 首先, 建立宏观纤维复合物的代表性体积元 (representative volume element, RVE) 模型 (图 2(a)). 为建立理论模型与有限元仿真之间的直接关联, 本研究中仿真所用关键参数均源自理论分析中的物理量定义. 具体对应关系如下: 理论模型中的纤维几何尺寸 (长度 L_p 、宽度 W_p 、高度 H_p) 直接对应仿真中纤维的实际尺寸; 材料参数 (如压电常数 d_{33} 、弹性模量 E 、密度 ρ) 与理论本构关系保持一致; 悬臂梁的边界条件 (固定端位移为 0、自由端受激励) 与理论振动方程 ((3) 式) 中的边界条件一致. 此外, 仿真中施加的体载荷对应于理论模型中的基础激励 $y_b(t)$, 从而确保仿真过程在物理本质上与理论模型一致. MFC 的代表性体积元模型尺寸参数如表 1 所列. 聚合物相使用美国 3M 公司的 DP460 对应参数, PZT-5H 型压电陶瓷使用课题组自主配方制备, 其材料参数使用测试参数, 如表 2 所列.

通过施加周期性边界条件, 模拟材料内部的周期性结构. 仿真得到的电场分布如图 2(b) 所示, 可

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

密度/(kg·m ⁻³)	压电常数/(10 ⁻¹² C·N ⁻¹)			介电常数			柔度矩阵/(10 ⁻¹² m ² ·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}
7590	791	-375	950	3130	3450	16.5	-4.8	-8.5	20.7	43.5	42.6

清晰观察到三个特征区域: 位于叉指电极正下方的“电场死区”, 其电场强度极弱; 靠近电极边缘的“过渡区”, 电场呈非均匀梯度分布; 位于两相邻叉指电极中间的“电场活化区”, 该区域电场分布均匀且强度高, 是产生有效压电响应的主要区域. 该结果表明宏观纤维复合物内部电场具有显著的非均匀性, 传统均匀场模型不再适用.

为建立纤维微结构参数与悬臂梁能量收集器宏观输出性能之间的定量关联, 构建了 MFC 悬臂梁系统的三维整体有限元模型 (图 3—图 6). 模型中, 梁的一端设为固定约束, 另一端自由, 通过在厚度方向 (Z 向) 施加分布载荷来模拟基础振动激励. 基于该模型, 系统地研究了纤维宽度 (0.25—0.50 mm) 与高度 (0.27—0.50 mm) 对应力场分布及输出电势的影响规律.

在长度维度上, 纤维长度固定为 60 mm. 该取值基于以下物理考虑: 过短的纤维将降低有效压电极化体积, 削弱机电耦合能力; 而过长的纤维则在周期性排布与柔性封装中易引入应力集中, 在长期动态载荷下可能发生断裂失效, 影响器件可靠性. 60 mm 长度在保证较高压电活性的同时, 兼顾了复合材料的柔顺性与结构耐久性, 适应低频振动能量收集的尺寸约束与循环疲劳要求. 本研究因此聚

焦于纤维宽度与高度这两个关键几何变量, 通过系统的参数化仿真, 揭示其对器件力学响应与电学输出的调控机制, 结果如图 3—图 6 所示.

图 3 与图 4 分别为不同纤维宽度下的应力分布图与电势分布图. 分析图 3 发现, 应力集中主要发生于固定端附近. 随着纤维宽度增加, 最大应力值呈现先增后减的趋势, 在 0.35 mm 宽度时应力集中情况相对缓和, 有利于器件长期可靠性. 如图 4 所示, 电势分布则呈现周期性, 输出电压幅值随纤维宽度增加而增大, 虽然在 0.50 mm 时电压输出最大, 但此时器件承受的应力较大, 应力集中明显, 极可能出现器件疲劳或损坏, 故综合权衡输出性能与可靠性, 选取 0.35 mm 为最优纤维宽度.

图 5 与图 6 分别为不同纤维高度下的应力分布图与电势分布图. 应力集中同样出现在固定端, 如图 5 所示, 在高度为 0.35 mm 时应力值最大. 图 6 电势分布显示输出电压在纤维高度为 0.35 mm 时达到峰值. 综合考虑输出性能与机械强度, 确定纤维高度最优值为 0.35 mm. 综上, 经过多尺度有限元仿真后预测: 当宏观纤维复合物的纤维尺寸为长 60 mm×宽 0.35 mm×高 0.35 mm 时, 能量收集器在获得高输出电压的同时, 能有效控制应力集中, 实现性能与可靠性的最佳平衡.

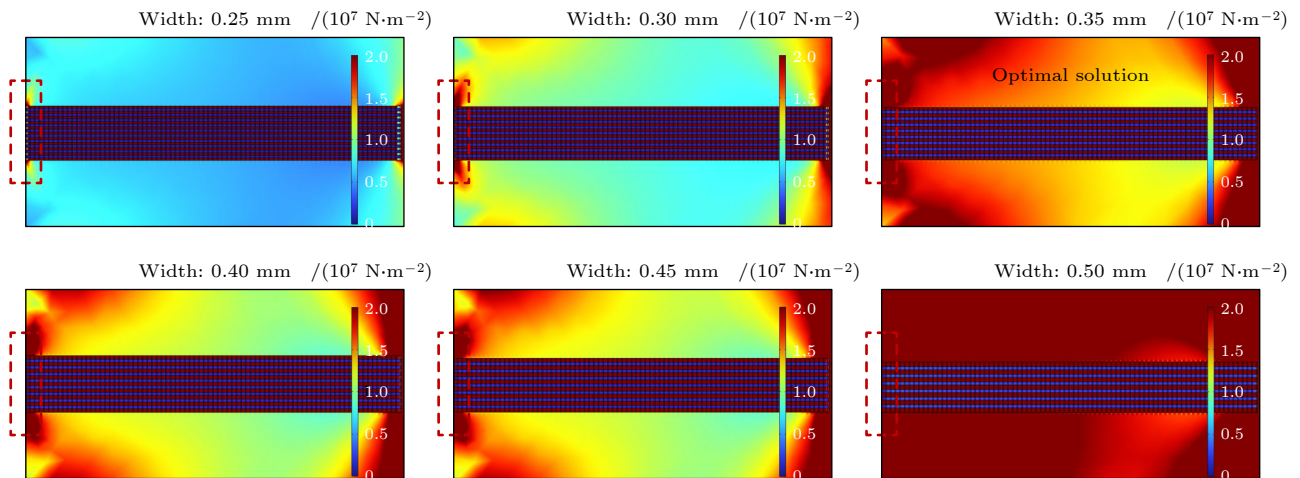


图 3 不同纤维宽度的 MFC 应力分布图
Fig. 3. Stress distribution of MFC with different fiber widths.

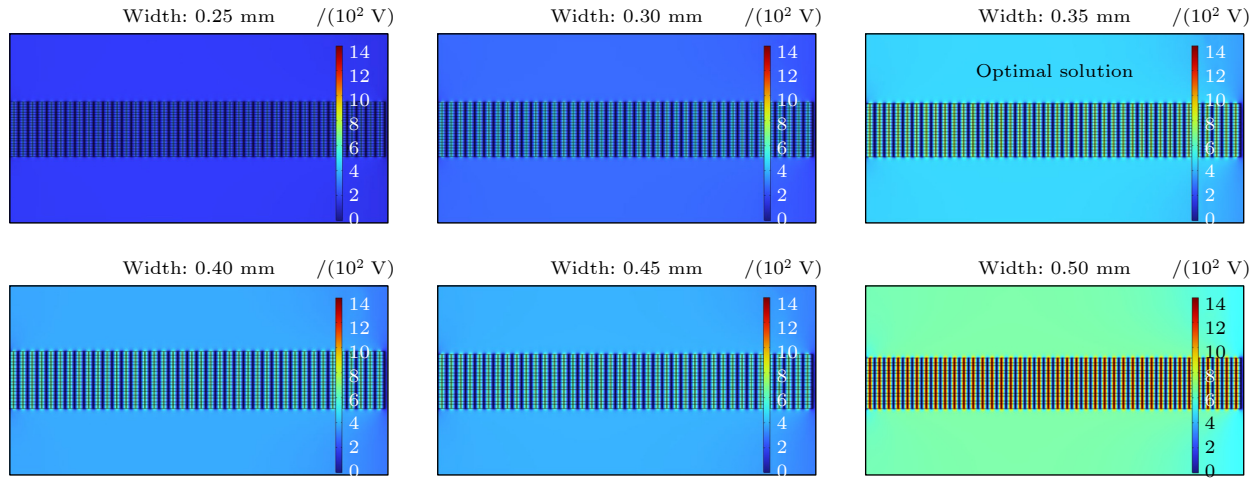


图 4 不同纤维宽度的 MFC 电势分布图

Fig. 4. Potential distribution of MFC with different fiber widths.

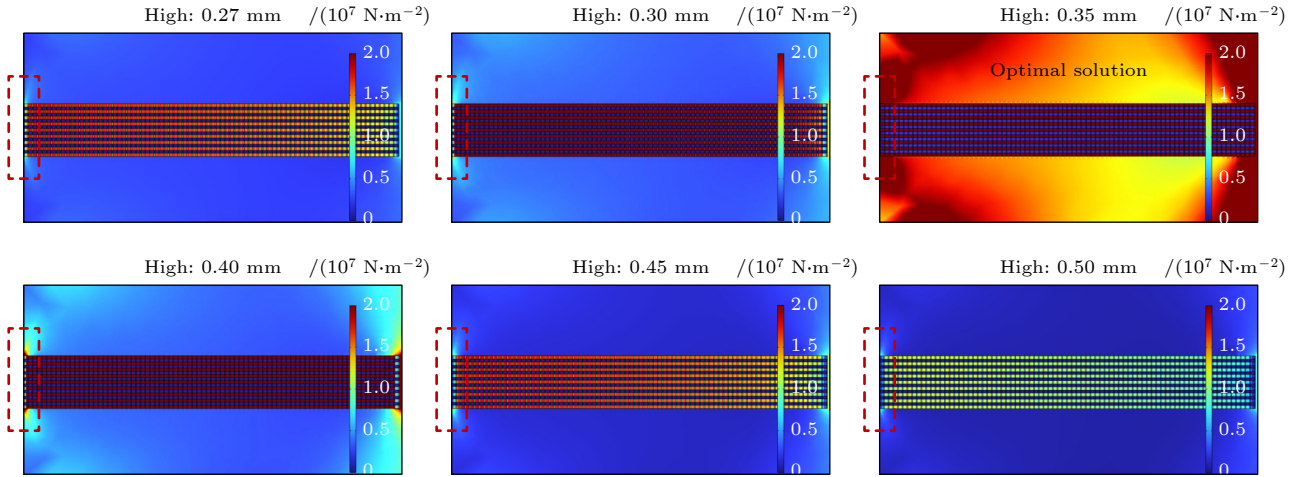


图 5 不同纤维高度的 MFC 应力分布图

Fig. 5. Stress distribution of MFC with different fiber heights.

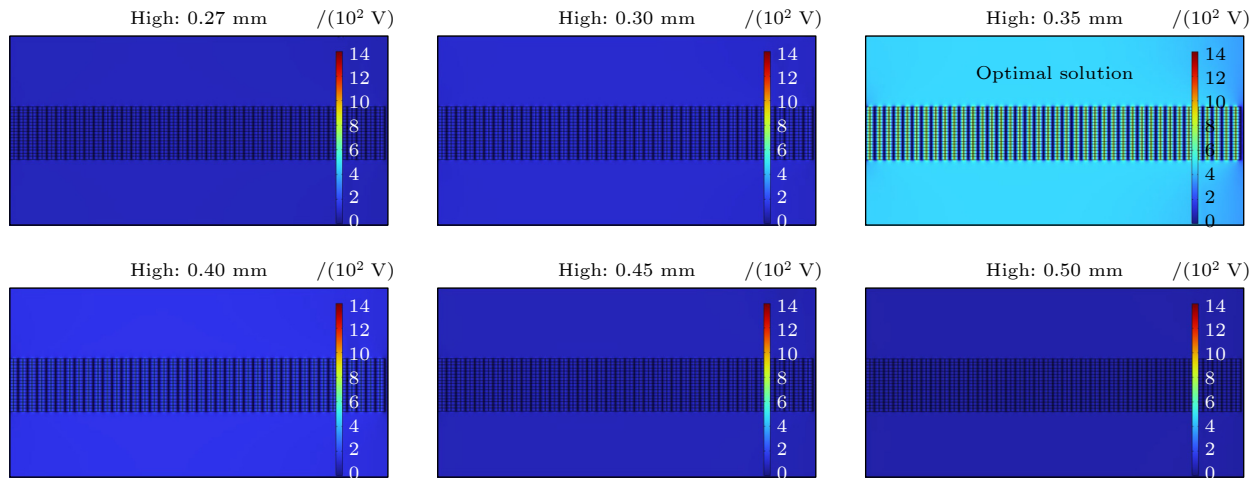


图 6 不同纤维高度的 MFC 电势分布图

Fig. 6. Potential distribution of MFC with different fiber heights.

3 实验验证及结果分析

3.1 MFC 样品的铁电性能分析

根据有限元分析结果指导实验, 制备压电能量收集器, 并对其铁电性能进行实验测试, 如图 7 所示. 测试前, 样品在 2000 V/mm 电场下极化 1000 s, 以确保电畴充分定向翻转. 首先, 测试了不同电压下电滞回线, 如图 7 所示, 随着驱动电压的增大, 极化越来越充分, P - E 曲线逐渐趋于饱和, 但是并未达到类似压电陶瓷一样的饱和极化现象, 这主要是因为 MFC 多层异质结构中的界面效应所导致, MFC 靠近叉指电极的界面处一旦存在缺陷 (如微观孔隙), 极易形成电荷累积, 发生介电失配甚至“电击穿”等器件损毁现象; 此外, MFC 靠近压电陶瓷的界面处, 极易形成应力集中和介电失配现象, 也影响了材料的力电耦合效果, 进而影响了 MFC 的铁电曲线. 多次实验表明: 随着电场进一步增大, 当电场超过 2000 V/mm 时易发生“电击

穿”等现象, 因此, 为了保证器件的稳定工作, 本文选取 2000 V/mm 电场作为最大极化电压.

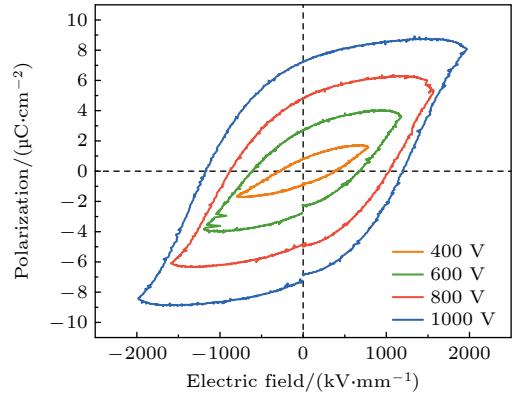


图 7 不同驱动电压下 MFC 的 P - E 曲线
Fig. 7. P - E curve of MFC under different driving voltages.

不同纤维宽度 MFC 在 2000 V/mm 驱动电场下的 P - E 曲线如图 8(a) 所示, 剩余极化强度 (P_r) 随纤维宽度增加呈上升趋势, 约由 0.35 mm 时的 $10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ 增至 0.5 mm 时的 $14 \mu\text{C}/\text{cm}^2$, 这主要源于压电陶瓷体积分数的提高. 然而, 在宽度达到

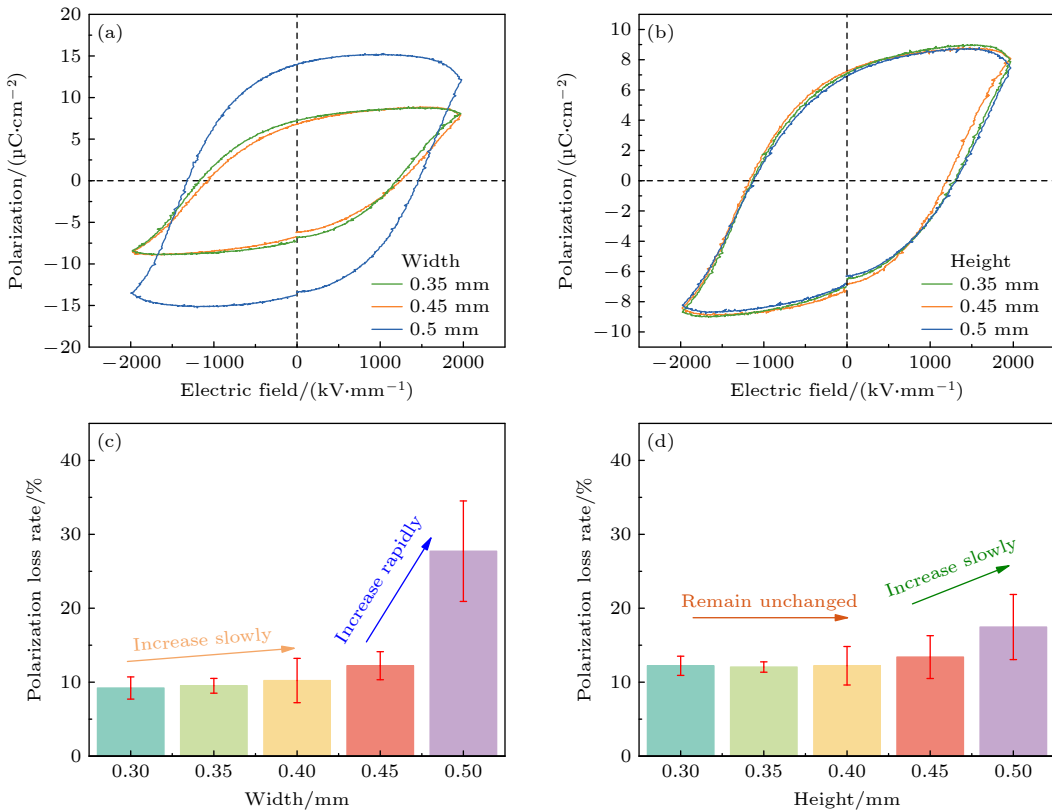


图 8 (a) 不同纤维宽度下宏观纤维复合物的 P - E 曲线; (b) 不同纤维高度下宏观纤维复合物的 P - E 曲线; (c) 不同纤维宽度极化损失率; (d) 不同纤维高度极化损失率

Fig. 8. (a) P - E curves of piezoelectric fiber composites under different fiber widths; (b) P - E curve of piezoelectric fiber composites with different fiber thicknesses; (c) polarization loss rate for different fiber widths; (d) polarization loss rate for different fiber heights.

0.5 mm 时, 电滞回线出现显著“低头”现象, 表明在高电场下器件漏电流明显增大, 反映出纤维-基体界面处的电荷输运损耗加剧, 可能由局部电场集中与界面缺陷共同导致. 该现象预示着在实际动态应力加载下, 器件更易发生电击穿, 影响长期可靠性. 结合仿真中揭示的应力分布结果, 宽度为 0.35 mm 时器件在电学性能与力学可靠性之间取得较佳平衡.

图 8(b) 为不同纤维高度在 1000 V 驱动电压下的 P - E 曲线, 三条曲线基本重合, 说明在所研究的高度范围内, 纤维高度对 MFC 的本征铁电性能影响甚微. 其影响机制主要体现在改变器件的截面惯性矩与应力传递路径, 进而调节宏观振动响应与电势输出, 这与第 2.3 节中的仿真结论一致.

为进一步量化电滞回线的非理想程度, 引入极化损失率:

$$\eta = (P_{atE_{max}} - P_{max}) / P_{atE_{max}} \times 100\%. \quad (15)$$

作为评价指标, 其中 $P_{atE_{max}}$ 为最大驱动电场处 (2000 V/mm) 对应的极化强度, P_{max} 为实际极化峰值.

图 8(c) 显示, 随纤维宽度增加, η 先缓后急上升, 在 0.5 mm 时达到最大. 这与图 8(a) 中“低头”趋势相对应, 直观地反映了宽纤维中界面区域电场畸变与介电失配的加剧, 导致高场下极化效率下降与损耗上升. 图 8(d) 表明, 纤维高度对 η 影响较小, 仅在高度较大时有缓慢上升趋势, 进一步印证高度变化主要通过机械耦合途径影响器件输出, 而非显著改变材料的极化微观过程.

上述结果从铁电性能层面系统揭示了纤维几何尺寸的影响机制: 宽度主要调控电场分布与界面

损耗, 高度则主导应力传递与结构刚度. 这为基于多物理场仿真的参数优化提供了关键实验依据, 亦明确了后续界面工程对提升 MFC 性能的重要性.

3.2 MFC 能量收集性能测试与对比

基于有限元仿真所确定的最优纤维几何参数 (长 60 mm × 宽 0.35 mm × 高 0.35 mm), 本研究制备了相应的 MFC 并集成为悬臂梁式能量收集器. 其中, MFC 功能材料复合层宽度为 6 mm, 粘贴于尺寸为 135 mm × 20 mm × 0.5 mm 的铝基板上. 该结构构型依据 2.2 节建立的 Euler-Bernoulli 梁理论设计, 旨在通过一阶弯曲模态实现低频谐振, 从而匹配环境微振动频段.

在 0.5g ($g \approx 10 \text{ m/s}^2$) 基础加速度激励下, 器件的实验频响特性如图 9(a) 所示. 测得谐振频率为 8.9 Hz, 与仿真预测值 9.0 Hz (见图 10) 的相对误差仅为 1.1%, 且与 (8) 式理论计算的基频高度吻合. 这一结果充分验证了理论模型及仿真在描述系统动力学特性方面的准确性. 谐振点处最大开路电压达 43 V, 表明通过有限元优化的纤维尺寸有效地增强了机电耦合响应. 频响曲线在 8.9 Hz 附近呈现典型的谐振峰值, 其 -3 dB 带宽约为 1 Hz, 说明器件在保持低频谐振的同时具备一定的频带适应性, 这主要由 MFC 的材料本征属性和系统机械阻尼决定.

图 9(b) 进一步展示了输出电压随激励加速度的变化关系. 输出电压呈非线性增长趋势, 该现象可从压电本构关系理解: 在弹性范围内, 极化电荷与应变成正比, 而悬臂梁自由端位移 (及约束端应变) 在简谐激励下与加速度幅值呈非线性关系, 体现了器件对微幅振动的高响应灵敏度.

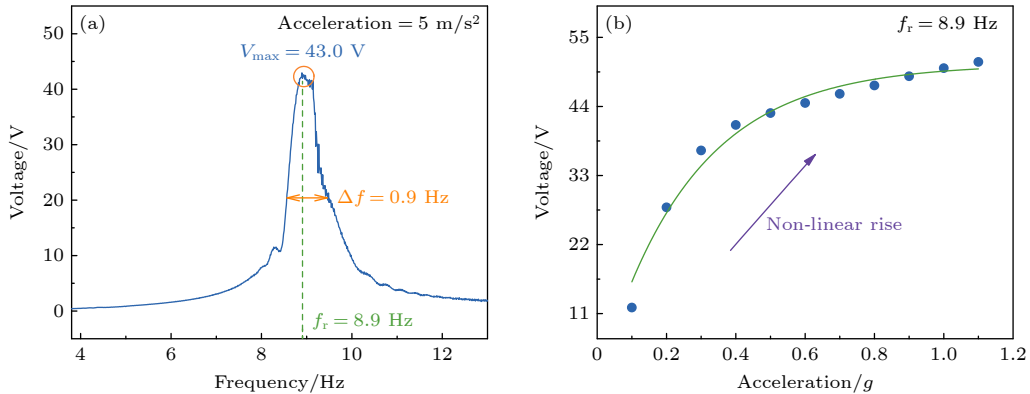


图 9 (a) 实验测试 MFC 频率与电压关系图; (b) MFC 的微振动响应

Fig. 9. (a) Experimental test of MFC frequency and voltage relationship; (b) micro-vibration response of MFC.

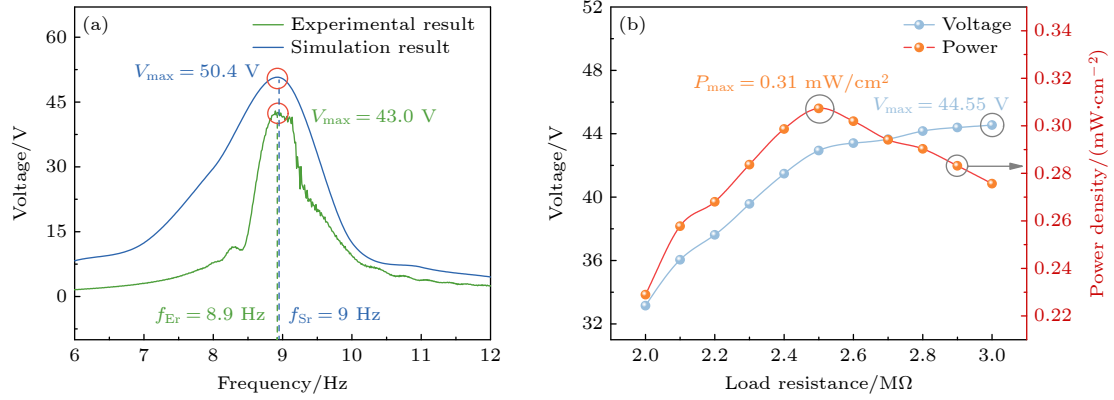


图 10 (a) 实验数据与仿真模拟结果对比图; (b) MFC 的不同阻抗下电压和功率密度图

Fig. 10. (a) Comparison of experimental data and simulation results; (b) voltage and power density under different load resistance of MFC.

为全面评估仿真模型的预测能力, 图 10(a) 将实验响应曲线与仿真结果进行对比. 仿真准确复现了实验曲线的谐振峰位置与形态, 再次确认频率预测的高精度. 然而, 仿真预测的峰值电压 50.4 V 高于实验值 43 V, 相对误差为 14.6%. 然而, 在非谐振频率处, 电压值的相对误差更大 (具体见附表 A1), 这种电压预测偏差主要源于模型中未能充分刻画的多物理场界面耦合效应. 在力学层面, MFC 与铝基板间的聚合物粘接层具有显著柔顺性, 其剪切变形会导致应变传递效率下降, 使得作用于压电纤维的有效机械激励减弱, 从而直接降低压电应变输出. 在电学层面, 粘接层及纤维/基体界面的介电特性会扰动电场分布, 并可能形成微漏导通道, 这不仅降低了极化效率, 也使得电极收集到的净电荷减少. 此外, 仿真中采用的集总阻尼模型未能反映实际界面处频散、非线性的耗能机制, 这种简化在非谐振区尤为显著, 导致仿真高估了系统的机电响应. 这些未被建模的界面力学、电学与阻尼行为, 共同构成了理论理想值大于实验真实值的物理本质. 未来的模型改进需引入表征界面相的多物理场本构关系, 以实现更精准的跨尺度预测.

功率密度是衡量能量收集器性能的关键指标, 其定义为输出功率与压电材料有效面积的比值. 根据最大传输定理, 其最大值出现在负载电阻 R_L 与压电器件的等效输出阻抗匹配时 (本器件约为 2.5 MΩ), 此时电压与电流的乘积达到最优. 功率密度受多重因素影响: 电学上, 取决于压电材料本身的 d_{33} 与 ϵ_{33} 参数以及负载匹配状态; 机械上, 取决于输入振动能在谐振频率下的放大效应以及 MFC 内部应力分布的均匀性 (如仿真优化所追求

的目标); 结构上, 则受纤维体积分数、电极配置及活性面积制约. 本研究中, 通过有限元仿真优化纤维几何尺寸 (长 60 mm × 宽 0.35 mm × 高 0.35 mm), 在提升输出电压的同时抑制了应力集中 (图 3 和图 5), 从而在机械端提升了能量转换的有效性, 这是获得 0.31 mW/cm² 峰值功率密度的重要基础, 如图 10(b) 所示. 优化后的 MFC 悬臂梁器件在低频微振动环境下具备可观的能量收集潜力. 下一步工作, 通过结合先进的能量管理电路, 可望进一步提升系统的净输出功率.

由此可见, 本研究构建了“理论建模-仿真预测-实验验证”的研究闭环. 首先, 基于 Euler-Bernoulli 理论推导的振动控制方程 ((3) 式) 和压电耦合方程 ((9) 式和 (10) 式) 提供了器件行为的物理描述. 其次, 有限元仿真将该理论模型转化为可计算的多物理场模型, 其参数设置 (见 2.3 节) 与理论严格对应, 从而实现了对器件性能 (如谐振频率、应力分布、电势输出) 的定量预测. 最后, 实验测试作为最终检验: 实测谐振频率 (8.9 Hz) 与仿真预测 (9.0 Hz) 误差仅为 1.1%, 强有力的验证了理论模型及仿真参数设置在动力学特性上的准确性. 虽然输出电压存在约 14.6% 的偏差 (主要源于未建模的界面层效应), 但整体趋势高度一致. 这表明, 本文所建立的理论及仿真框架能够可靠地指导 MFC 能量收集器的设计与参数优化.

4 结 论

本研究通过多尺度有限元仿真与实验验证相结合的方法, 系统地研究了宏观纤维复合物的

“微结构设计-多物理场耦合仿真-实验验证”一体化框架, 研究明确了关键几何参数对其低频微振动能量收集性能的影响, 并成功地实现了参数优化设计, 研究结果为高性能、可定制化的 MFC 能量收集器的高效工程化设计提供了有效工具. 主要结论如下.

1) 建立了宏观纤维复合物的代表性体积元模型, 揭示了其内部电场呈非均匀分布的特性, 并明确了位于叉指电极间隙、电场分布均匀的“电场活化区”是产生有效压电响应的核心区域.

2) 通过对 MFC 悬臂梁能量收集器进行三维整体有限元建模, 系统地分析了纤维宽度与高度对应力分布及电势输出的影响规律. 仿真预测指出, 当纤维尺寸为 60 mm (长)×0.35 mm (宽)×0.35 mm (高) 时, 器件能在获得高输出电压的同时有效抑制应力集中, 实现性能最优化.

3) 依据仿真优化结果制备了 MFC 器件, 铁电性能测试表明, 在 2000 V/mm 电场下极化 1000 s 后, 器件具有稳定的铁电特性. 不同尺寸的测试结果与仿真预测趋势一致, 验证了仿真模型的有效性.

4) 能量收集性能测试显示, 优化后的 MFC 悬臂梁器件谐振频率为 8.9 Hz, 在 0.5g 加速度激励下开路电压达 43 V, 在匹配 2.5 M Ω 负载电阻时峰值功率密度为 0.31 mW/cm². 仿真与实验在谐振频率上高度吻合 (误差 1.1%), 证实了本文所提多尺度有限元预测方法在指导低频压电能量收集器设计方面的准确性与实用性.

本研究不仅为面向物联网分布式传感节点的微振动能量收集提供了明确的 MFC 器件参数优化方案, 而且所构建的“微结构设计-多物理场耦合仿真-实验验证”一体化研究框架, 为后续开发更高性能、可定制化的智能压电复合材料与器件提供了有效途径.

感谢武汉理工大学材料科学与工程学院陈文教授在研究过程中给予的宝贵指导.

附 录

根据实验数据和仿真结果 (图 9 和图 10), 计算了各频率点输出电压的相对误差, 在表 A1 列出.

表 A1 MFC 的电压仿真值与实测值误差对比

Table A1. Comparison of voltage simulation values and measured values of MFC.

频率/Hz	仿真电压值	实测电压值	绝对误差	相对误差/%
6	8.257	1.57	6.687	80.99
7	12.398	3.08	9.328	75.16
8	29.661	7.8	21.861	73.70
9	50.423	43	7.423	14.72
10	12.481	9.58	2.901	23.24
11	6.7786	3.84	2.9386	43.35
12	4.5132	2.53	1.9832	43.94

参考文献

- [1] Khazaei M, Rezaniakolaie A, Rosendahl L 2020 *Nano Energy* **76** 104978
- [2] Nurettin S, Muammer K 2020 *Nano Energy* **80** 105567
- [3] Qi Y C, Zhao J Q, Zeng J H, Cao X X, Qin Y H, Cao J, Gong L K, Huang X L, Wang Z Z, Liu G X, Zhang C 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 40141
- [4] Zhou J J, Zhou J, Chen W, Tian J, Shen J, Zhang P C 2022 *Compos. Struct.* **299** 116019
- [5] Zhou J J, Zhou J, Yu Y Y, Shen J, Zhang P C, Chen W 2023 *Ceram. Int.* **49** 32528.
- [6] Palayil D, George B 2021 *IEEE Sens. J.* **21** 3831
- [7] Li L, Liu H B, Li D F, Zhang W M 2023 *Mech. Syst. Sig. Process.* **192** 110223
- [8] Li H, Zhou J J, Sun Q, Chen W, Zhou J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 147701 (in Chinese) [李昊, 周晶晶, 孙琪, 陈文, 周静 2025 物理学报 **74** 147701]
- [9] Fan G F, Wang Y J, Tian F, Hao M M, Wen Y, Xu Y Z, Zeng F F, Lu W Z 2021 *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* **32** 1997
- [10] Ibrahim D S, Feng Y X, Shen X, Umer S, Abdurrahman U A 2023 *Mech. Adv. Mater. Struct.* **30** 1340
- [11] Wang J L, Han C Y, Soo Ho Jo, Xu W H, Tian H G 2024 *Ocean Eng.* **300** 117459
- [12] Guo L K, Wang H 2023 *Energy* **263** 125870
- [13] Yang X, Zhou J, Zhang S, Shen J, Chen W 2015 *Ferroelectrics* **477** 131
- [14] Parangusan H, Karuppasamy K, Bhadra J 2024 *J. Alloys Compd.* **989** 174254
- [15] Otero J A, Rodríguez Ramos R, Espinosa Almeyda Y, Sabina F J, Levin V 2023 *Acta Mech.* **234** 2087
- [16] Marwa M, Mnaouar C 2023 *J. Compos. Mater.* **57** 273
- [17] Qin Z, Zhou J J, Liu R J, Cheng Z, Liu K, Zhou J, Shen J, Jin W, Chen W 2025 *Measurement* **253** 117480
- [18] Gao Y K, Zhao J, Zhou J J, Zhou J 2025 *Acta Phys. Sin.* **74** 057701 (in Chinese) [高裕昆, 赵洁, 周晶晶, 周静 2025 物理学报 **74** 057701]
- [19] Huang R, Zhou J J, Shen J, Tian J, Zhou J 2024 *Materials* **17** 3033
- [20] Shen J, Song J C, Zhou J, Zhou J J 2021 *Bull. Chin. Ceram. Soc.* **40** 4118 (in Chinese) [沈杰, 宋佳畅, 周静, 周晶晶 2021 硅酸盐通报 **40** 4118]
- [21] Li J H, Zhou J, Shen J, Tian J, Zhou J J 2022 *Piezoelectr. Acoustoopt.* **44** 537 (in Chinese) [李加红, 周静, 沈杰, 田晶, 周晶晶 2022 压电与声光 **44** 537]
- [22] Ju S, Chae S H, Choi Y, Ji C H 2015 *Sens. Actuators, A* **226** 126

- [23] Panda S, Reddy H N, Kumar P S A 2015 *Arch Appl. Mech.* **85** 691
- [24] Zhang H, Sun W, Luo H T, Shen J, Zhang R F 2024 *Appl. Acoust.* **220** 109961
- [25] Konka P H, Wahab M, Lian K 2013 *Sens. Actuators, A* **194** 84
- [26] Lin Q B, Chen S X, Huang Y, Wang H, Wu Y B, Jin Y S, Liu R F, Shi Q S, Liang Y R 2024 *Polymer* **304** 127162
- [27] Wakshume D G, Placzek M L 2024 *Electronics* **13** 987
- [28] Liu J J, Xu Z X, Yu J L, Gu S M, Xu G S 2025 *AIP Adv.* **15** 075201
- [29] Gao S C, Zhang Z, Li Y D, Su Z Y, Dong J S, Zhang R M, Zhou W, Ni H X, Chen Y, Liu Y 2025 *iScience* **28** 113069
- [30] Clough R W, Penzien J (translated by Wang G Y) 2006 *Structural Dynamics* (Beijing: Higher Education Press) pp284–327 (in Chinese) [克拉夫 R, 彭津 J 著 (王光远译) 2006 结构动力学 (北京: 高等教育出版社) 第 284—327 页]
- [31] Chen Y 2021 *M. S. Thesis* (Wuhan: Wuhan University of Technology) (in Chinese) [陈瑶 2021 硕士学位论文 (武汉: 武汉理工大学)]

Finite element-based parameter optimization for low-frequency micro-vibration energy harvesting using macro fiber composites*

XU Feiyue¹⁾ ZHOU Jingjing^{1)†} ZHOU Jing^{2)3)‡} WU Shan¹⁾
ZHU Yong¹⁾ ZHANG Lei¹⁾

1) (Anhui Key Laboratory of Information Functional Materials and Devices, Fuyang Normal University, Fuyang 236037, China)

2) (School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

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

(Received 7 January 2026; revised manuscript received 2 February 2026)

Abstract

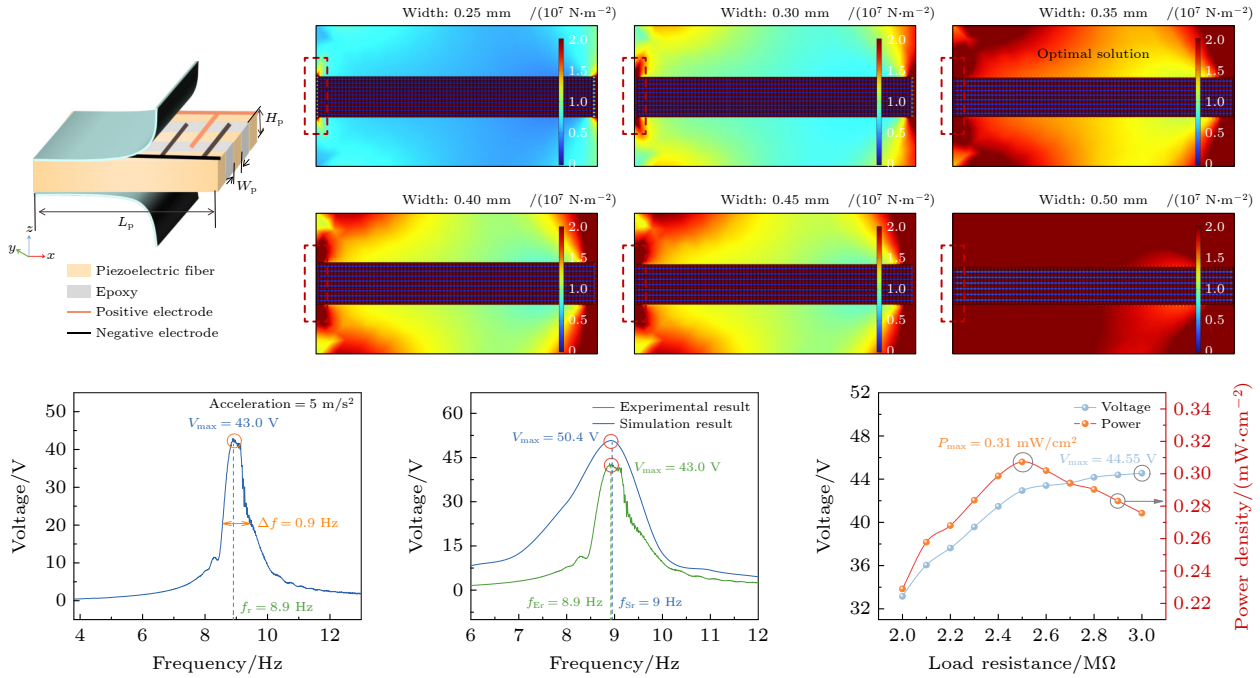
Distributed sensing nodes in the internet of things (IoT) require efficient and adaptable electromechanical transduction mechanisms for harvesting low-frequency micro-vibration energy. Macro fiber composites (MFCs), exhibiting high piezoelectric coefficients and exceptional flexibility, constitute promising material solutions for this purpose. However, their performance is constrained by non-uniform internal electric field distributions and an incomplete understanding of the relationships between critical structural parameters and output characteristics. To address these challenges, a multi-scale parameter optimization framework integrating finite element simulation with experimental validation is proposed. A representative volume element (RVE) model is developed to elucidate the non-uniform electric field distribution and reveal the pivotal role of the ‘electric-field activated zone’. Building upon these insights, a comprehensive three-dimensional cantilever beam model is constructed to systematically investigate the effects of fiber width and height on stress and electric potential distributions. Finite element analyses indicate that an MFC energy harvester with optimal fiber dimensions of 60 mm (length)×0.35 mm (width)×0.35 mm (height) achieves enhanced output voltage while concurrently minimizing stress concentration. Guided by these optimal parameters, a prototype MFC energy harvester is fabricated and experimentally characterized. Under harmonic excitation at the resonant frequency of 8.9 Hz with an acceleration amplitude of 0.5g, the prototype exhibits an open-circuit voltage of 43 V and a peak power

* Project supported by the Anhui College Students’ Innovation and Entrepreneurship Training Program, China (Grant No. S202410371050), the Open Project of the Key Laboratory of Information Functional Materials Structure and Devices of Anhui Provincial Universities and the Sub-project of the University-Level First-Class Characteristic Discipline of Physics, China (Grant No. 24YLTS05-2505), and the Key Project of Fuyang Normal University Youth Talent Fund, China (Grant No. rexm202402).

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

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

density of 0.31 mW/cm^2 at the optimal load resistance of $2.5 \text{ M}\Omega$. Excellent agreement between numerical predictions and experimental measurements is achieved, with a resonant frequency deviation of only 1.1%. This study establishes optimal dimensional parameters for MFC-based low-frequency micro-vibration energy harvesting and presents a robust design methodology for high-performance, customizable energy harvesting systems.



Keywords: macro fiber composites, finite element analysis, energy harvesting, low-frequency vibration

DOI: [10.7498/aps.75.20260033](https://doi.org/10.7498/aps.75.20260033)

CSTR: [32037.14.aps.75.20260033](https://cstr.net.cn/32037.14.aps.75.20260033)



基于有限元预测的宏观纤维复合物低频微振动能量收集参数优化

徐飞跃 周晶晶 周静 武山 朱勇 张磊

Finite element-based parameter optimization for low-frequency micro-vibration energy harvesting using macro fiber composites

XU Feiyue ZHOU Jingjing ZHOU Jing WU Shan ZHU Yong ZHANG Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100809 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20260033

CSTR: 32037.14.aps.75.20260033

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20260033>

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

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>

压电纤维复合材料智能传感器的有限元预测与器件性能

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

物理学报. 2025, 74(5): 057701 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241379>

一种轴径双向分离式电磁线圈驱动装置的结构响应特性

Analysis of structural response characteristics of a bidirectional separated electromagnetic coil drive device

物理学报. 2024, 73(13): 130201 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240239>

高分子囊泡在微管流中惯性迁移现象的有限元分析

Finite element analysis of inertial migration of polymer vesicles in microtubule flow

物理学报. 2022, 71(18): 188701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220606>

二维有限元方法研究石墨烯环中磁等离子激元

Study of magnetoplasmons in graphene rings with two-dimensional finite element method

物理学报. 2023, 72(8): 087301 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20222467>

基于热超构材料的能量收集与热电转换特性

Energy harvesting and thermoelectric conversion characteristics based on thermal metamaterials

物理学报. 2022, 71(20): 207304 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221061>