

贴敷压电纤维复合材料固支梁的振动特性分析

郑轩宇

长安大学理学院, 陕西 西安

收稿日期: 2025年11月24日; 录用日期: 2025年12月8日; 发布日期: 2026年2月27日

摘要

压电纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)由NASA兰利研究中心开发, 具有尺寸紧凑、柔性良好和优异的压电性能, 因而在传感、驱动、能量采集及微机电系统等领域得到广泛关注。作为常用的振动控制作动器, MFC的引入会显著改变结构的动力学特性, 因此研究贴敷MFC后梁结构的振动行为十分必要。当前关于MFC-固支梁体系中几何尺寸与贴敷区参数对振动特性影响的研究仍较有限。文章基于哈密顿原理建立了贴敷MFC的固支梁动力学模型, 并采用伽辽金法离散得到系统的固有特性。随后探讨了MFC的尺寸、铺设位置等因素对梁结构固有频率的影响规律, 并通过仿真和实验验证了模型的准确性。

关键词

压电纤维复合材料, 运动微分方程, 压电实验

Analysis of the Vibration Characteristics of Macro Fiber Composite Materials with Fixed Beam Structures

Xuanyu Zheng

School of Sciences, Chang'an University, Xi'an Shaanxi

Received: November 24, 2025; accepted: December 8, 2025; published: February 27, 2026

Abstract

Macro Fiber Composite (MFC), developed by NASA's Langley Research Center, is a piezoelectric material characterized by its small size, flexibility, and strong electromechanical performance. These features enable its extensive use in sensing, actuation, energy harvesting, and MEMS applications. When employed as an actuator in vibration control, MFC can significantly modify the dynamic behavior of the host structure, making it essential to understand the vibration characteristics of beams

文章引用: 郑轩宇. 贴敷压电纤维复合材料固支梁的振动特性分析[J]. 力学研究, 2026, 15(1): 1-10.

DOI: 10.12677/ijm.2026.151001

with bonded MFC layers. However, studies focusing on how the geometric and placement parameters of MFC influence the natural frequencies of MFC-clamped beam systems remain limited. In this work, the governing equations of a clamped beam with surface-bonded MFC are formulated using Hamilton's principle and discretized with the Galerkin method to obtain the system's natural characteristics. The effects of MFC dimensions and bonding location on the vibration response are systematically analyzed, and numerical simulations together with experiments are conducted to validate the proposed theoretical model.

Keywords

Macro Fiber Composite, Differential Equations of Motion, Piezoelectric Experiment

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

压电纤维复合材料(Macro Fiber Composite, MFC)由 NASA Langley 研究中心提出[1], 其通过将矩形压电陶瓷纤维嵌入聚合物基体, 使材料既保持了较高的压电常数, 又具有优异的柔性与可贴敷性[2]-[4]。与传统脆性压电陶瓷相比, MFC 在弯曲结构上的适应性更强, 兼具高可靠性与高机电耦合性, 因而在智能结构领域受到广泛关注[5]-[7]。目前, MFC 在能源采集、传感监测以及结构主动控制等方面, 已展现出显著应用潜力[8]-[11]。

围绕 MFC 的力学性能与结构耦合特性, 大量研究聚焦于其驱动能力、有限元建模精度及智能结构中的响应行为。已有学者基于机电阻抗方法开展结构损伤监测实验[9] [12], 也有研究者利用 MFC 实现悬臂梁、轨道及薄板结构的能量采集与振动调控[10]-[14]。在主动振动控制方面, MFC 已成功应用于旋转叶片形面控制[13]、机翼变形控制[7]、复合材料层合板主动振动抑制[15]以及柔性反射器形状保持等场景[16], 均取得良好的实验效果。

与此同时, 随着建模精度的提高, 研究者提出了多类考虑纤维铺设角度、几何非线性及热机耦合的高精度 MFC 有限元模型[17]-[20], 其中包括典型的 Reissner-Mindlin 理论框架、非线性层合模型以及基于叉指电极的压电耦合单元模型[21] [22]。这些模型显著提升了 MFC 作动行为预测的准确性, 为结构优化与振动控制提供了可靠手段。

然而, 相较于上述对作动性能与控制算法的研究, 有关 MFC 贴敷后对梁结构固有振动特性的影响机制, 尤其是固支梁结构, 相关文献仍较为有限。MFC 贴敷会引入附加质量、附加刚度以及电致应变产生的等效弯矩, 使梁的固有频率、振型分布和局部动力响应产生变化[23]-[25]。现有研究虽然对悬臂梁、薄板结构的固有频率变化进行了探讨[14] [25], 但对固支梁结构中 MFC 尺寸参数(相对长度比、相对宽度比、厚度)与贴敷位置的耦合影响规律尚缺乏系统化理论描述。

固支条件下梁的弯曲约束更强, 模态密集且对局部刚度变化更敏感, 因此 MFC 引入的非均匀刚度与分布式弯矩会对结构一阶与高阶频率产生更复杂的影响。为了准确预测这种频率变化趋势, 有必要建立能够同时描述压电耦合效应、结构几何参数及贴敷区域布局的动力学模型。

基于上述需求, 本文利用哈密顿原理推导了 MFC-固支梁的耦合动力学方程, 并通过伽辽金法获得离散化的近似求解形式。在此基础上系统讨论了 MFC 的相对尺寸参数及贴敷位置对结构一阶固有频率的影响规律, 并结合有限元仿真与实验结果对理论模型进行了验证。研究成果不仅揭示了 MFC 对固支梁振

动特性调控的本质机制，也为智能梁结构的设计与优化提供理论参考。

2. 模型描述与动力学方程建立

压电材料的本构方程为

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{S}^{E_{ef}} \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{d} \mathbf{E}_{ef}, \mathbf{D} = \mathbf{d}^T \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\xi}^\sigma \mathbf{E}_{ef} \quad (1)$$

式中 $\boldsymbol{\varepsilon}$ 、 $\boldsymbol{\sigma}$ 、 \mathbf{D} 、 \mathbf{E}_{ef} 为应变、应力、电位移和电场向量， $\mathbf{S}^{E_{ef}}$ 和 $\boldsymbol{\xi}^\sigma$ 分别为常电场下的柔度系数矩阵和常应力下的介电系数矩阵， \mathbf{d} 为应变压电系数矩阵。

本文以 Smart Material 公司生产的纤维方向与长度方向一致的 MFC 作为研究对象，该产品分为 P1 型 (d33 模式) 和 P2 型 (d31 模式) 两种，通常约定 3 方向为 MFC 极化方向，2 方向为 MFC 平面的横向。其中，由于 P1 型 MFC 额定的工作电压范围为 -500~1500 V，相较于 P2 型 MFC 易产生较大变形，常作为作动器使用，因此后续推导以 P1 型为对象。

本文将 MFC-固支梁考虑为一维问题，仅对 MFC-固支梁 3 方向进行讨论，将式(1)化简为一维形式

$$\varepsilon_3 = s_{33} \sigma_3 + d_{33} E_{ef3}, D_3 = d_{33} \sigma_3 + \xi_{33}^\sigma E_{ef3} \quad (2)$$

式中 d_{33} 是应变压电系数分量， E_{ef3} 是电场强度分量。 ε_3 、 σ_3 是应变及应力分量式中 s_{33} 为常电场下的柔度系数 $s_{33}^{E_{ef}}$ 的简写， ξ_{33}^σ 为常应力下介电系数 ξ_{33}^σ 的简写。

对式(2)进行移项，改写成自变量为 σ_3 、 D_3 的方程

$$\varepsilon_3 = s_{33}^D \sigma_3 + g_{33} D_3, E_{ef3} = -g_{33} \sigma_3 + \beta_{33} D_3 \quad (3)$$

式中 g_{33} 为压电电压常数， β_{33} 为常应力下的介电隔离率系数， s_{33}^D 为常电场下的柔度系数。

$$g_{33} = d_{33} / \xi_{33}^\sigma, \beta_{33} = 1 / \xi_{33}^\sigma, s_{33}^D = s_{33} - d_{33} g_{33} \quad (4)$$

将式(3)进行移项，改写为自变量为 ε_3 、 D_3 的方程

$$\sigma_3 = c_{33}^D \varepsilon_3 - h_{33} D_3, E_{ef3} = -h_{33} \varepsilon_3 + \beta_{33}^\varepsilon D_3 \quad (5)$$

式中 c_{33}^D 为常电位移下的刚度系数， h_{33} 为压电刚度系数， β_{33}^ε 为常应变下的介电隔离率系数。

$$c_{33}^D = 1 / s_{33}^D, h_{33} = g_{33} / s_{33}^D, \beta_{33}^\varepsilon = g_{33} h_{33} + \beta_{33} \quad (6)$$

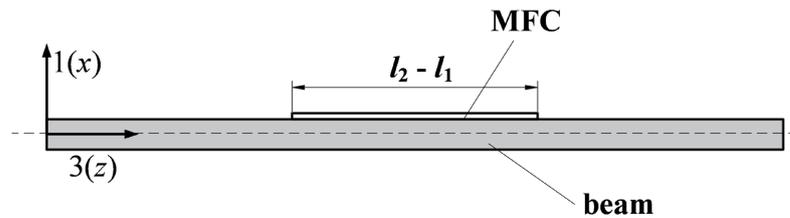


Figure 1. MFC-beam structure schematic diagram

图 1. MFC-梁结构示意图

MFC-固支梁结构示意图见图 1，梁的长度记为 L ，MFC 边界的坐标记为 l_1 和 l_2 ($0 < l_1 < l_2 < L$, $l_2 - l_1 = a$, $L = A$)，横向位移记为 $w(z, t)$ ，假定在 MFC 作用下固支梁发生纯弯曲，忽略轴向拉伸量，且不会导致中性层改变 ($h \ll H$)，则结构应变 ε_3 可以表示为

$$\varepsilon_3 = -x w_z''(z, t) \quad (7)$$

结构的总动能 T 包括梁的动能和压电片的动能，表示为

$$\begin{aligned}
 T &= \frac{1}{2} \int_0^L \rho_{be} BH (\dot{w}(z,t))^2 dz + \frac{1}{2} \int_{l_1}^{l_2} \rho bh (\dot{w}(z,t))^2 dz \\
 &= \frac{1}{2} \int_0^L \left((H(z-l_1) - H(z-l_2)) \rho hb (\dot{w}(z,t))^2 + \rho_{be} HB \right) dz
 \end{aligned} \tag{8}$$

式中 $H(z)$ 为单位阶梯函数。为便于后续推导，做出以下简化

$$\begin{aligned}
 G(z) &= H(z-l_1) - H(z-l_2) \\
 \rho(z) &= \rho_{be} HB + \rho hb G(z)
 \end{aligned} \tag{9}$$

变分形式的压电材料的势能 δU_p 在一维形式下为

$$\delta U_p = \int_V (\sigma_3 \delta \varepsilon_3 + E_{ef3} \delta D_3) dV \tag{10}$$

将式(5)代入式(10)得压电片势能的展开式

$$\begin{aligned}
 \delta U_p &= \int_V \left((c_{33}^D \varepsilon_3 - h_{33} D_3) \delta \varepsilon_3 + (-h_{33} \varepsilon_3 + \beta_{33}^e D_3) \delta D_3 \right) dV \\
 &= b \int_{l_1}^{l_2} \int_{\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}+h} \left((c_{33}^D \varepsilon_3 - h_{33} D_3) \delta \varepsilon_3 + (-h_{33} \varepsilon_3 - \beta_{33}^e D_3) \delta D_3 \right) dx dz
 \end{aligned} \tag{11}$$

梁的势能 δU_{be} 等于

$$\delta U_{be} = \int_V \sigma_{be3} \delta \varepsilon_3 dV = B \int_0^L \int_{-\frac{H}{2}}^{\frac{H}{2}} (c_{33} \varepsilon_3 \delta \varepsilon_3) dx dz \tag{12}$$

结构总势能 δU 与压电片势能 δU_p 和梁势能 δU_{be} 的关系为

$$\delta U = \delta U_p + \delta U_{be} \tag{13}$$

压电材料作为作动器对结构的做功 δW 为

$$\begin{aligned}
 \delta W &= \int_{l_1}^{l_2} U_{ef}(z,t) \delta Q dz \\
 &= \int_{l_1}^{l_2} \mathbf{E}_{ef}(z,t) \left(\int_S \delta \mathbf{D}(z,t) \mathbf{n} dA \right) dz
 \end{aligned} \tag{14}$$

根据哈密顿原理，按不同变分原理可整理得到 MFC-梁结构在域内的运动微分方程

$$\rho(z) \ddot{w}(z,t) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \left(d(z) w_z''(z,t) \right) = \frac{bh_{33}}{2\beta_{33}^e} (Hh + h^2) E_{ef3z}''(z,t) \tag{15}$$

上式中 $d(z)$ 为

$$d(z) = c(z) - G(z) \frac{(bh_{33}(Hh + h^2))^2}{4b\beta_{33}^e h} \tag{16}$$

运动微分方程的半解析解：

使用伽辽金法将结构的位移场 $w(z,t)$ 进行离散

$$w(z,t) = \sum_i^N \phi_i(z) q_i(t) \tag{17}$$

式中 $\phi_i(z)$ 为试探函数， $q_i(t)$ 为广义坐标，固支架的试探函数为

$$\phi_i(z) = \left(\frac{z}{a}\right)^{i+1} \left(\frac{z}{a} - 1\right)^2 \quad (18)$$

电场 $E_{ef3}(z, t)$ 在压电片贴附区域是均匀的, 大小与对应时刻的电压相关, 关系式为

$$E_{ef3}(z, t) = G(z)E_{ef3}(t) \quad (19)$$

将 $\phi_i(z)$ 与离散后的式(15)叠加并在域内进行积分, 整理成以下形式

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} = E_{ef3}\mathbf{P} \quad (20)$$

式中 \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{P} 分别为质量阵、刚度阵和载荷向量, 各项元素的表达式为

$$M_{ij} = \int_0^L c_{33}BH\phi_i\phi_j(z)dz + \int_{l_1}^{l_2} C_{33}^D bh\phi_i\phi_j(z)dz \quad (21)$$

$$K_{ij} = K_{ij}^1 + K_{ij}^2 + K_{ij}^3 + K_{ij}^4 \quad (22)$$

$$P_i = \int_0^L \frac{bh_1}{\beta_1} G''(z)\phi_i(z) = \frac{bh_{33}}{2\beta_{33}^e} (Hh + h^2)\phi_i'(z) \Big|_{l_1}^{l_2} \quad (23)$$

其中

$$K_{ij}^1 = \int_0^L \frac{c_{33}'BH^3}{12} \phi_i^{(4)}(z)\phi_j(z)dz \quad (24)$$

$$K_{ij}^2 = \int_{l_1}^{l_2} K_p \phi_i^{(4)}(z)\phi_j(z)dz \quad (25)$$

$$K_{ij}^3 = 2 \int_0^L K_p \frac{dG(z)}{dz} \cdot \phi_i^{(3)}(z)\phi_j(z)dz \quad (26)$$

$$K_{ij}^4 = \int_0^L K_p G''(z) \cdot \phi_i''(z)\phi_j(z)dz \quad (27)$$

$$K_p = c_{33}^D b \left(\frac{1}{4} H^2 h + \frac{1}{2} H h^2 + \frac{h^3}{3} \right) - \frac{h_{33}^2 bh (H + h)^2}{4\beta_{33}^e} \quad (28)$$

使用分部积分对上式进行降阶并整合至式(22)得

$$K_{ij} = \int_0^L \frac{Bc_b^D H^3}{12} \phi_i''(z)\phi_j''(z)dz + K_p \int_{l_1}^{l_2} \phi_i''(z)\phi_j''(z)dz \quad (29)$$

观察质量阵 \mathbf{M} 、刚度阵 \mathbf{K} 可以发现, 粘贴压电片后, 结构对应位置产生了相应的附加质量和附加刚度, 若去掉该附加质量和附加刚度, 方程退化成典型固支梁的运动方程, 求解方程的特征值和特征向量可以得到结构各阶的固有频率及振型。

3. 验证与分析

为验证推导的运动微分方程有效性, 采用力锤法开展模态测试, 通过调整夹具相对位置, 测定不同长度 MFC-固支梁的固有频率。实验装置如图 2(a)所示: 激光位移传感器由电源 A 供电, 其采集的梁测点位移数据通过采集卡 A 传输至上位机; 同时上位机输出的电压信号经采集卡 B 传送至电压放大器, 最终加载到 MFC 上。

经实验测得的物理参数如下: 铝梁的密度 $\rho_{be2} = 2684.1 \text{ kg/m}^3$ 、弹性模量 $E_{be2} = 68.5 \text{ GPa}$ 、泊松比 $\nu_{be2} = 0.3$, 梁的宽度 B 为 20 mm、高度 H 为 2 mm; MFC 的长度 a 为 85 mm、宽度 b 为 14 mm、高度 h 为 0.3 mm。参考文献[22]设定 MFC 材料参数后, 构建 MFC-固支梁结构的高精度有限元模型, 开展压电模态仿

真分析，模型细节如图 2(b)所示。为实现解析解、有限元仿真与实验结果的相互验证，将 MFC 中心与梁中心对齐固定，选取 340 mm、360 mm、380 mm 三种不同梁长工况开展对比分析，定义解析解与有限元仿真结果的偏差为 e_{FEM} ，与实验数据的偏差为 e_{EXP} ，具体结果如表 1 所示。结果显示，三者的验证误差均控制在 5% 以内，一致性良好，表明所推导的理论解具有较高可靠性。



Figure 2. MFC-solid beam structure experimental setup
图 2. MFC-固支梁结构实验装置

Table 1. Comparison of first-order natural frequency results of MFC-fixed beam structures with different beam lengths L
表 1. 不同梁长 L 的 MFC-固支梁结构的一阶固有频率结果对比

Length/mm	Theoretical Result/Hz	FEM/Hz	e_{FEM}	Experiment/Hz	e_{EXP}
340	83.38	83.00	-0.46%	80.95	-2.91%
360	74.46	73.85	-0.82%	71.56	-3.89%
380	66.89	66.39	-0.75%	64.19	-4.36%

通过在 Matlab 中编程，选取十阶试探函数，代入与仿真和实验相同的参数，计算了 MFC-固支梁结构和典型固支梁一系列长度算例的解析解，频率的单位为 Hz。

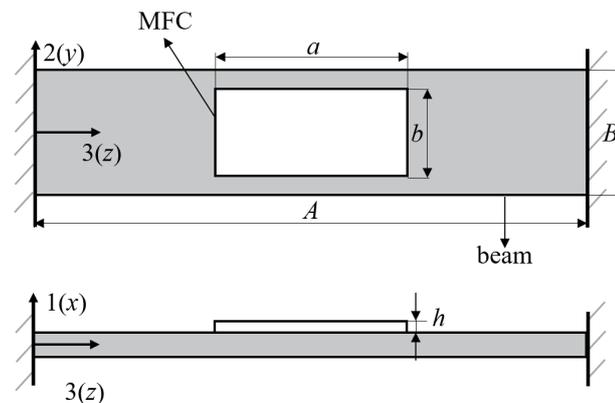


Figure 3. Schematic diagram of MFC-fixed support beam structure
图 3. MFC-固支梁结构示意图

为探究 MFC (压电纤维复合材料)对固支梁结构固有频率的影响规律，本文选取梁长 400 mm 的工况作为研究对象，MFC-固支梁的结构示意图如图 3 所示。定义相对长度比 $R_a = A/a$ (其中 A 为固支梁长度)，

通过调整 MFC 的自身长度可改变该相对长度比；以 z 表示 MFC 的中心点坐标，通过调整 z 值能够改变 MFC 在固支梁表面的贴敷位置。基于上述参数设置，绘制不同 MFC 贴敷位置下，结构一阶固有频率与 $1/R_a$ 的变化关系曲线，结果如图 4 所示。

分析图 4 可知，当 $1/R_a$ 值趋近于 0 时，结构的一阶固有频率逐渐逼近未粘贴 MFC 的纯固支梁固有频率；随着 $1/R_a$ 的持续增大，结构一阶固有频率呈现出先降低后升高的变化特征。此外，MFC 贴敷位置越接近固支梁的中点， $1/R_a$ 对结构固有频率的影响程度越显著。

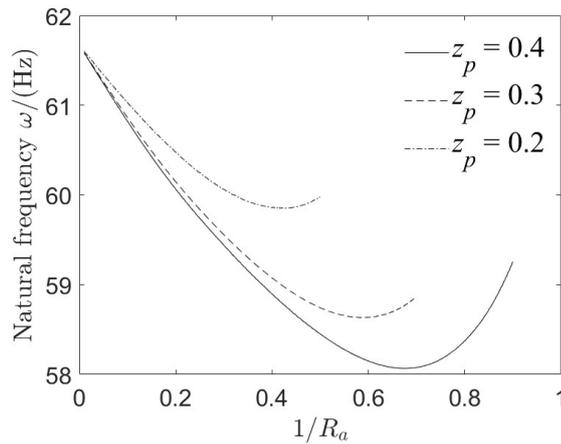


Figure 4. The relationship between the first-order natural frequencies of the MFC's relative width ratio R_a when the MFC is located in different positions

图 4. MFC 位于不同位置时结构的一阶固有频率随相对宽度比 R_a 的变化关系

结构的频率最终趋于未粘贴 MFC 片的固支梁频率，并且受 MFC 贴敷位置影响不明显，随着 MFC 的截面宽度的增大，结构的频率开始下降，在 MFC 尺寸和结构尺寸相当时达到最小值，贴敷位置越接近中心位置，达到最小频率越小。

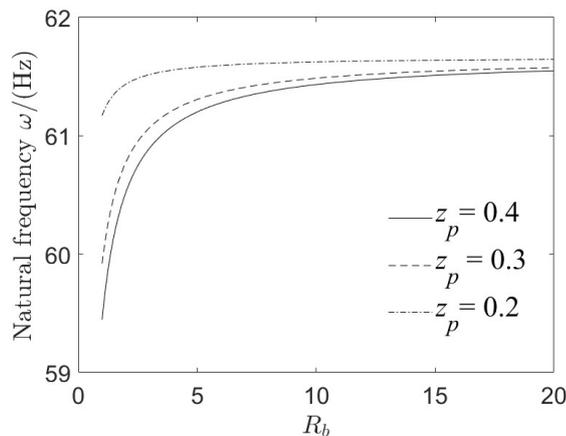


Figure 5. Relationship between first-order natural frequencies and MFC's relative width ratio R_b when the MFC at different positions

图 5. MFC 位于不同位置时结构的一阶固有频率随相对宽度比 R_b 的变化关系

根据图 4、图 5 可以看出，MFC 贴敷位置的变化对结构的频率影响存在一定关系。以 400 mm 梁为例，图 6 绘制了不同厚度的 MFC 贴敷位置变化时一阶固有频率变化，从图中可知结构的一阶固有频率的

变化率会随着 MFC 位置向中间移动逐渐变小，MFC 的厚度越大，贴敷越贴近边缘时结构的一阶固有频率越大，同时越接近中心时，MFC 厚度越大，一阶固有频率越小。

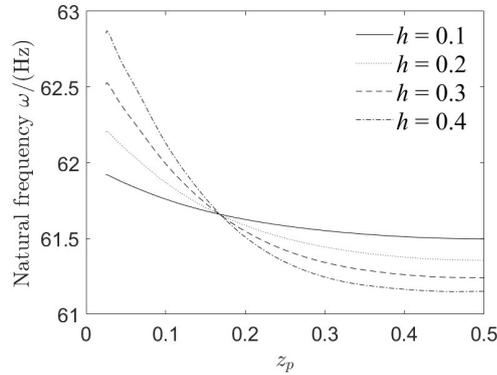


Figure 6. The relationship between the first natural frequency of MFC structures with different thicknesses and the variation of the bonding position

图 6. 不同厚度 MFC 结构的一阶固有频率随贴敷位置的变化关系

为进一步验证贴敷位置对一阶固有频率的影响，以 340 mm 的梁长为例，分别通过实验测出其固有频率，与理论的对比如表 2 所示，可以观察到实验结果与理论结果吻合较好，且可以看出随着贴敷位置的变化，一阶固有频率的变化率发生了变化。

Table 2. Comparison of the first natural frequency results of MFC-supported beam structures with different MFC bonding positions

表 2. 不同 MFC 贴敷位置的 MFC-固支梁结构的一阶固有频率结果对比

z_p	Theoretical Result/Hz	Experiment/Hz	Error
0.3	83.39	82.86	-0.64%
0.4	82.82	80.02	-3.50%
0.5	82.68	78.74	-5.00%

图 7 展示了 MFC 粘贴在不同位置时梁结构的一阶振型。由图像可得，MFC 的贴敷位置对固支梁的振型影响较小，仅引起振型峰值略微偏移。当 MFC 从梁中部移动时，振型的峰值会朝与 MFC 移动方向相反的方向偏移。

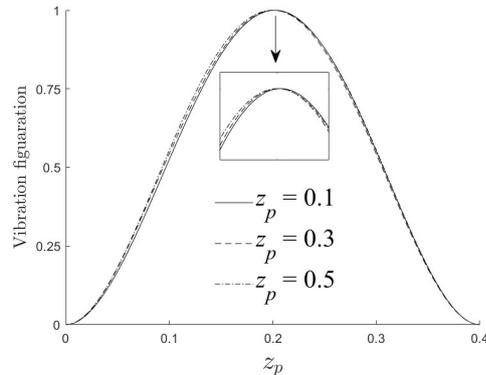


Figure 7. The first mode shape variation of the structure when MFC is located at different positions

图 7. MFC 位于不同位置时结构的一阶振型变化

4. 结论

本研究围绕贴敷压电纤维复合材料(MFC)的固支梁振动特性展开系统探究,通过哈密顿原理构建耦合动力学模型,结合伽辽金法获得近似解析解,并经有限元仿真与实验验证形成完整的“建模-求解-验证”体系,不仅填补了固支梁结构中MFC尺寸与贴敷参数耦合影响规律的研究空白,更为智能结构的动力学设计提供了理论支撑与量化依据,并得出以下结论:

- 1) 结构一阶固有频率随相对宽度比 R_b 增大趋近于纯固支梁频率,随 $1/R_a$ (相对长度比倒数)增大呈“先降后升”特征,且MFC贴敷位置越靠近梁中点,两参数的影响越显著。
- 2) MFC贴敷位置向梁中点靠近时,结构一阶固有频率逐渐降低,且降低速率减缓,同时振型峰值向MFC移动的反方向轻微偏移。
- 3) MFC厚度与贴敷位置存在交互影响:贴敷于梁边缘时,MFC厚度越大,一阶固有频率越高;贴敷于梁中心附近时,MFC厚度越大,一阶固有频率越低。

参考文献

- [1] Wilkie, W.K., Bryant, R.G., High, J.W., Fox, R.L., Hellbaum, R.F., Jalink, A., *et al.* (2000) Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications. *Proceedings Volume 3991, Smart Structures and Materials 2000: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, Newport Beach, 6-9 March 2000, 323-334. <https://doi.org/10.1117/12.388175>
- [2] Park, S., Kim, H., Vosgueritchian, M., Cheon, S., Kim, H., Koo, J.H., *et al.* (2014) Stretchable Energy-Harvesting Tactile Electronic Skin Capable of Differentiating Multiple Mechanical Stimuli Modes. *Advanced Materials*, **26**, 7324-7332. <https://doi.org/10.1002/adma.201402574>
- [3] 丁贝贝, 吴先梅, 韩星辰, 等. PVDF 压电薄膜传感特性研究[J]. 压电与声光, 2018, 40(2): 170-173.
- [4] Brett, W.R. (2004) Nonlinear Mechanical and Actuation Characterization of Piezoceramic Fiber Composites. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [5] 李宝, 应琴, 袁卫锋. MFC 压电悬臂梁发电性能研究[J]. 机械设计与制造, 2016(5): 88-94.
- [6] 李晨露, 李涛, 李小方, 等. 漂浮阴极 SMFC 传感器产电信号对不同重金属污染的响应特征及机制研究[J]. 环境科学学报, 2022(12): 207-214.
- [7] 李欢庆, 陈龔斌, 王东. 基于 MFC 驱动器的飞机翼面结构参数控制设计[J]. 机械与电子, 2022, 40(11): 20-24.
- [8] Sodano, H.A., Park, G., Leo, D.J. and Inman, D.J. (2003) Use of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Charging Batteries. *Proceedings of SPIE*, Vol. 5050, 101-108. <https://doi.org/10.1117/12.484247>
- [9] 吴斌, 佟啸腾, 刘增华, 等. 基于机电阻抗技术的管道法兰结构健康监测实验研究[J]. 实验力学, 2025(5): 516-521.
- [10] 张辉, 孙伟, 骆海涛. 贴敷 MFC 复合材料薄板半解析建模及减振分析[J]. 航空动力学报, 2024, 39(12): 195-208.
- [11] 谢伟平, 陈谣, 王先锋. 基于 MFC 的地铁轨道振动能量收集研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(9): 210-236.
- [12] 芮小博, 李一博, 刘悦, 等. 垂向动磁式压电振动能量收集器建模及实验研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8): 215-221.
- [13] 张博, 丁虎, 陈立群. 基于压电纤维复合材料的旋转叶片主动控制[J]. 力学学报, 2021, 53(4): 1093-1102.
- [14] 张红艳, 白长青, 沈亚鹏. 粗纤维压电复合材料(MFC)对旋翼桨叶模型扭转控制的实验及数值研究[J]. 应用力学学报, 2009(3): 456-460.
- [15] Liu, T., Liu, C. and Zhang, Z. (2024) Adaptive Active Vibration Control for Composite Laminated Plate: Theory and Experiments. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **206**, Article ID: 110876. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110876>
- [16] 卢志荣, 王晓明, 周文雅. MFC 驱动主动反射器形面的有限时间动态变形控制[J]. 振动与冲击, 2023, 42(4): 325-332.
- [17] Zhang, S., Li, Y. and Schmidt, R. (2015) Modeling and Simulation of Macro-Fiber Composite Layered Smart Structures. *Composite Structures*, **126**, 89-100. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.02.051>
- [18] Zhang, S., Wang, Z., Qin, X., Zhao, G. and Schmidt, R. (2016) Geometrically Nonlinear Analysis of Composite Laminated

Structures with Multiple Macro-Fiber Composite (MFC) Actuators. *Composite Structures*, **150**, 62-72.

<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.037>

- [19] Pandey, A. and Arockiarajan, A. (2017) An Experimental and Theoretical Fatigue Study on Macro Fiber Composite (MFC) under Thermo-Mechanical Loadings. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, **66**, 26-44.
<https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2017.06.005>
- [20] 刘永刚, 陈勇, 沈星. 叉指形电极压电驱动器性能分析[J]. 电子元件与材料, 2005(4): 1-4+8.
- [21] 肖广军, 潘成亮, 刘永斌, 等. 螺旋叉指电极式压电圆片换能器的有限元分析与实验比较[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 131-135.
- [22] 涂建维, 张家瑞, 罗威, 等. 宏纤维复合平板结构的作动方程与试验验证[J]. 武汉大学学报(工学版), 2019, 52(4): 324-330.
- [23] Rahman, N.U., Alam, M.N. and Ansari, J.A. (2021) An Experimental Study on Dynamic Analysis and Active Vibration Control of Smart Laminated Plates. *Materials Today: Proceedings*, **46**, 9550-9554.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.083>
- [24] 陶鸿飞, 崔升. 压电智能结构的主动控制及压电执行器布局优化[J]. 动力学与控制学报, 2019, 17(3): 234-243.
- [25] 张博, 谢华珂, 丁虎, 等. 压电纤维复合材料对悬臂结构的作动行为研究[J]. 力学学报, 2024, 56(5): 1439-1447.