

# 基于三明治结构的压电纤维复合材料 有限元建模与实验验证

陈青乾<sup>1,2</sup>, 李伟光<sup>1</sup>, 张子尧<sup>1</sup>, 曹潘文<sup>1</sup>, 贺顺<sup>3</sup>

(1.长安大学 理学院, 陕西 西安 710064; 2.长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064;  
3.西北工业大学 航空学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**压电纤维复合材料(macro-fiber composite, MFC)具有柔韧性佳、环境适应性强且驱动力大等优势,在航空、航天、航海等诸多领域得到广泛应用。针对传统 MFC 有限元建模方法在计算精度与计算成本之间的矛盾,提出了一种基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法。考虑交叉铜电极对 MFC 刚度的贡献,提出了一种基于“电极层-活性层-电极层”三明治结构的 MFC 有限元建模方法。利用 ANSYS-APDL 软件建立了 MFC 的三明治有限元模型,计算得到其在实际工况下的自由应变和阻力,验证了所建立的有限元模型的合理性。对粘贴有 MFC 作动器的悬臂梁结构进行了“压电-结构”耦合有限元建模、数值仿真与实验验证。结果表明,相较于传统均质化有限元建模方法,所提基于三明治结构的有限元建模方法明显提升了 MFC 驱动特性的模拟精度,同时与细观尺度上的精细化有限元建模方法相比,有效节约了计算成本,具有良好的工程实用价值。

**关键词:**压电纤维复合材料;三明治结构;有限元;模态分析

**中图分类号:**TN382;TB381

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-2758(2026)01-0160-09

压电材料是一类能够实现机械能与电能相互转换的智能材料,凭借其正、逆压电效应,在航空、航天及航海等众多领域展现出了巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。其中,压电纤维复合材料(macro-fiber composite, MFC)是由美国航空航天局的兰利研究中心研制出的新型压电陶瓷材料<sup>[4]</sup>,具有机电耦合性能好、驱动力大、柔韧性好、耐腐蚀等优点<sup>[5]</sup>,目前已被广泛应用于结构振动主动控制<sup>[6-7]</sup>、结构健康监测<sup>[8-9]</sup>和能量俘获<sup>[10-11]</sup>等领域。

压电材料的力-电耦合效应是影响 MFC 驱动和传感性能的关键因素<sup>[12]</sup>。有限元建模方法凭借其在预测压电材料力-电耦合效应方面的高效性,已成为深入研究 MFC 驱动/传感性能的关键技术手

段。传统 MFC 有限元建模方法主要包括精细化建模方法和均质化建模方法。

精细化建模方法是在细观尺度上对 MFC 进行精确模拟的一种有限元建模方法,具有预测精度高的优势。Deraemaeker 等<sup>[13]</sup>针对 MFC 力-电耦合性能的数值评估问题,采用经典层合板理论对 MFC 进行了精细化有限元建模,并通过数值仿真验证了该建模方法的可行性。高裕昆等<sup>[14]</sup>基于精细化建模方法,建立了 MFC 的代表性体元模型,并通过 MFC 的传感性能数值仿真与实验研究,验证了所建立模型的准确性。李加红等<sup>[15]</sup>针对 MFC 低频传感性能预测问题,利用 COMSOL 软件建立了 MFC 的精细化有限元模型,并将其与悬臂梁结构有限元模型耦合,开展了“压电-结构”耦合数值仿真与实验测试,验证了所建立的有限元模型能够准确预测 MFC 的低频传感性能。然而,基于精细化建模方法所构建的有限元模型,常因构造复杂而导致计算成本较高,不利于其工程实际应用。

考虑到精细化建模方法在计算成本方面的局限性,研究人员进一步提出了均质化建模方法以增强

**收稿日期:**2025-05-21

**基金项目:**国家自然科学基金(12502201, 12102317)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2025JC-YBQN-056)、长安大学中央高校基本科研业务费(300102124105)与大学生创新创业训练计划(202510710097X, S202510710160)资助

**作者简介:**陈青乾(2003—),本科生

**通信作者:**李伟光(1994—),副教授 e-mail:liwg@chd.edu.cn

其实用性。该方法是将 MFC 视为宏观尺度上的均匀材料,通过对其相关参数进行等效修正,能够显著降低模型的复杂程度和计算成本。Steiger 等<sup>[16]</sup>针对 MFC 的有限元建模问题,将 MFC 视为板状均匀压电陶瓷材料,建立了其均质化有限元模型,并通过数值仿真验证了该模型的合理性。段青放<sup>[17]</sup>针对 MFC 的驱动性能预测问题,利用代表性体元建模方法确定了 MFC 的等效参数,建立了 MFC 均质化有限元模型,并通过其静/动力学特性分析,验证了该模型具有良好的模拟效果。黄丹丹等<sup>[18]</sup>利用 ANSYS-APDL 软件建立了 MFC 的均质化有限元模型,并通过对粘贴有 MFC 作动器的悬臂梁结构进行数值仿真和实验研究,验证了所提均质化建模方法的有效性。然而,均质化建模方法忽略了 MFC 的结构细节,尤其是未能考虑交叉铜电极对 MFC 刚度的贡献,导致该建模方法对于 MFC 力-电耦合性能的预测精度往往较低,不利于其在结构振动主动控制、精密仪器位移控制等领域中的应用。

因此,针对传统 MFC 有限元建模方法的局限性,提出了一种基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法,旨在提升模型预测精度的同时降低其计算成本。

## 1 MFC 有限元建模及数值仿真

### 1.1 基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法

如图 1 所示,MFC 主要由 5 种材料,分 7 层构成。其中,中间层是由压电陶瓷纤维嵌入环氧树脂胶体构成的,压电陶瓷纤维主要起驱动作用,环氧树脂胶体则用于固定和保护压电陶瓷纤维。中间层的上、下两侧均布有交叉铜电极层,用于给压电陶瓷纤维施加驱动电压。交叉铜电极层的外侧依次覆盖丙烯酸层和聚酰亚胺薄膜,用于保护内部结构并延长 MFC 的使用寿命<sup>[19]</sup>。

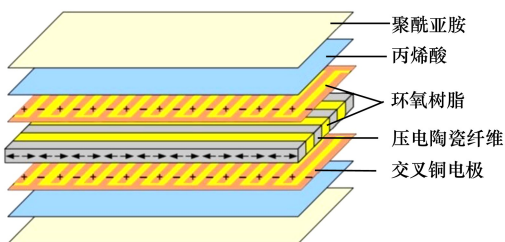


图 1 MFC 结构示意图<sup>[20]</sup>

本文以 M-8557-P1 压电作动器为研究对象,其相关性能参数如表 1 所示,基于有限元建模方法仅研究其在  $d_{11}$  工作模式下的力-电耦合效应。其中,压电材料的一维本构方程可以表示为

$$S = s_{11}^E T + d_{11} E \quad (1)$$

式中:  $S$  为压电材料的应变;  $T$  为应力;  $E$  为电场强度;  $s_{11}^E$  为柔度系数;  $d_{11}$  为压电常数。在自由应变工况下  $T = 0$ , 则

$$S = d_{11} E \quad (2)$$

在双端固定约束工况下  $S = 0$ , 则

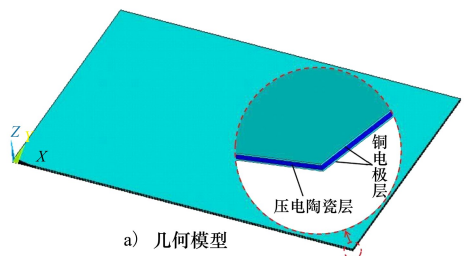
$$T = -c_{11}^E d_{11} E \quad (3)$$

式中,  $c_{11}^E = \frac{1}{s_{11}^E}$  为刚度系数。

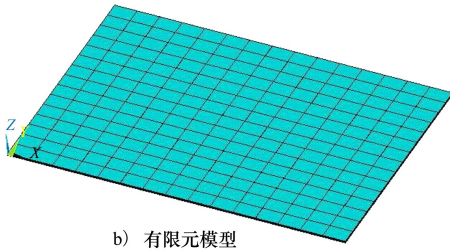
表 1 M-8557-P1 压电作动器性能参数

整体长度/ mm	整体宽度/ mm	静电容量/ nF	驱动位移/ $\mu\text{m}$	阻滞力/ N
103	64	16	114.75	693

在实际工程应用中,大多研究采用均质化建模方法对 MFC 进行有限元建模,相较于细观尺度上的精细化建模方法,该方法能够有效降低有限元模型的复杂程度和计算成本,但其往往忽略了交叉铜电极对于 MFC 刚度的贡献,导致所建立的模型精度不高,限制了其在精密驱动场景中的应用。因此,本节在均质化建模方法基础上,进一步考虑交叉铜电极对 MFC 刚度的贡献,提出了一种基于“电极层-活性层-电极层”三明治结构的 MFC 有限元建模方法,即在均质化压电陶瓷层的上、下两侧建立均质化铜电极层,由此构建 MFC 的三明治模型,利用 ANSYS-APDL 软件建立的 MFC 几何模型与有限元模型如图 2 所示。其中,铜电极层选用 Solid 186 单元,压电陶瓷层选用压电耦合 Solid 5 单元。



a) 几何模型



b) 有限元模型

图 2 MFC 三明治模型

表 2 材料参数

参数模型	弹性模量/GPa	泊松比	密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	压电常数 $d_{11}$ /( $\text{pC} \cdot \text{N}^{-1}$ )
三明治模型	压电陶瓷层	$9 \times 10^{-5}$	0.33	4 880
	铜电极层	100	0.33	8 900
均质化模型 <sup>[17]</sup>	33	0.33	4 880	240

## 1.2 数值仿真验证

MFC 有限元模型的合理性可以通过计算其在实际工况下的自由应变与阻滞力来验证,即采用传统均质化模型和所建立的三明治模型分别计算 MFC 的自由应变与阻滞力,并与表 1 中的 MFC 作动器性能参数进行对比研究,验证所提基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法的合理性。

### 1) MFC 自由应变预测

为了避免 MFC 作动器原始长度对其驱动位移的影响,本节采用自由应变来衡量上述有限元模型的准确性。在 MFC 自由应变预测环节,需对有限元模型一侧施加固定约束和零电压,另一侧施加最大工作电压,求解其自由端的位移,进而获取其自由应变。具体边界条件设置为<sup>[21]</sup>:位于 MFC 作动器  $xoy$  平面内的节点仅允许在  $xoy$  平面内移动;位于  $xoz$  平面内的节点仅允许在  $xoz$  平面内移动;一端  $yoz$  平面完全固定且设置电压为 0 V,另一端  $yoz$  平面自由且将电压设置为 1 500 V。

基于上述边界条件,MFC 三明治模型和均质化模型自由端位移分别为  $113 \mu\text{m}$  和  $108 \mu\text{m}$ ,由此可以计算得到 2 种 MFC 有限元模型的自由应变分别为  $1 097 \mu\epsilon$  和  $1 049 \mu\epsilon$ ,将其与制造商提供的 MFC 作动器在其最高工作电压 1 500 V 驱动下的自由应变  $1 114 \mu\epsilon$  对比,所建立的 MFC 三明治模型的模拟精度为 98.47%,相较于均质化模型提升了 4.35%。

### 2) MFC 阻滞力预测

在 MFC 阻滞力预测环节,需对有限元模型两侧均施加固定约束,然后在一侧施加零电压,并在另一

侧施加最大工作电压,进而求解阻滞力的大小。具体边界条件设置与 MFC 自由应变预测环节保持一致,同时附加以下条件<sup>[21]</sup>:两端  $yoz$  平面均施加固定约束。

MFC 三明治模型和均质化模型的阻滞力预测结果分别为 694 N 和 724 N,与制造商提供的 MFC 作动器的阻滞力 693 N 相比,所建立的 MFC 三明治模型的模拟精度为 99.86%,相较于均质化模型提升了 4.33%。

据文献[18]可知,可以采用 MFC 作动器自由应变与阻滞力连线的拟合情况评估 MFC 有限元模型的建模精度。因此,本文综合对比了 MFC 三明治模型和均质化模型的自由应变与阻滞力计算结果以及制造商所提供的性能参数,如图 3 所示。

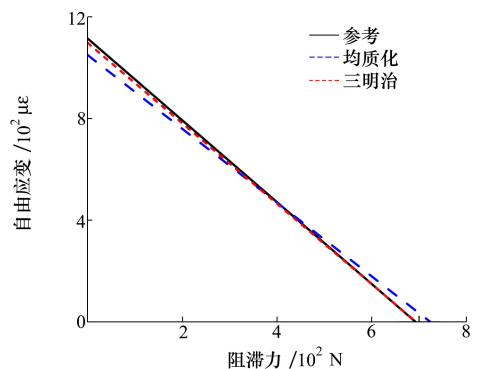


图 3 MFC 驱动性能曲线

基于所建立的 MFC 三明治模型计算得到的 MFC 作动器驱动性能曲线与制造商提供的性能曲

线基本吻合,明显优于均质化模型的模拟精度,验证了所提基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法的合理性。此外,本文所建立的 MFC 三明治模型与均质化模型的网格数量分别为 1 350 和 450,同时,据已有文献[13,16]可知,MFC 精细化模型的网格数量通常为 8 000~12 000。因此,MFC 三明治模型和均质化模型的计算成本明显低于精细化模型,同时,相较于均质化模型,所提 MFC 三明治模型在小幅增加网格数量的同时能够明显提升 MFC 作动器驱动性能的预测精度,具有良好的工程实用价值。

## 2 压电悬臂梁结构有限元建模与验证

为了进一步验证所建立的 MFC 三明治模型的高效性,本节选用粘贴有 MFC 作动器的悬臂梁结构进行有限元建模、数值仿真与实验验证。

### 2.1 压电悬臂梁结构有限元建模

本节以粘贴有 M-8557-P1 压电作动器的悬臂梁结构作为研究对象,如图 4 所示,其中,悬臂梁结构由 7075 铝合金制成,密度设置为  $2\ 750\ \text{kg}/\text{m}^3$ ,弹性模量为 68 GPa,泊松比为 0.33。

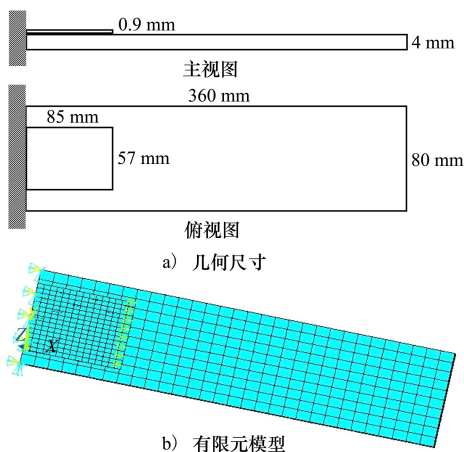


图 4 压电悬臂梁结构

同样利用 ANSYS-APDL 软件分别建立由 MFC 三明治模型和 MFC 均质化模型构成的压电悬臂梁结构耦合有限元模型(下文简称三明治耦合有限元模型和均质化耦合有限元模型)。其中,MFC 作动器的参数设置以及单元类型选择与 1.1 节保持一致,悬臂梁结构选用 Solid 186 单元建模。同时,采用 MPC (multi-point constraint, MPC) 刚性约束将 MFC 作动器与悬臂梁结构耦合,即将多个节点约束

在一个刚性区域内,节点之间没有相对变形,相当于刚性连接,从而使其接触面的共节点具有相同的自由度。

### 2.2 静态电压驱动特性分析

本节开展压电悬臂梁结构静态电压学驱动特性分析,通过对比数值仿真与实验测试结果,验证所建立的 MFC 三明治模型的准确性。

压电悬臂梁结构静态电压驱动特性实验的目的是测试 MFC 作动器在静态驱动电压下悬臂梁结构端部的位移响应规律。如图 5 所示,实验系统主要由三部分组成:第一部分为研究对象,由 M-8557-P1 压电作动器和铝合金悬臂梁组成,二者通过环氧树脂胶接;第二部分为信号发生装置,由 PC 主机、Quanser 实时控制仿真系统和压电功率放大器组成;第三部分为信号采集装置,由激光位移传感器及其控制器组成。具体实验步骤为:首先在 PC 主机中搭建信号发生器模块,经过 Quanser 输出板卡将数字信号转化为驱动电压信号,再由压电功率放大器放大,输入至 MFC 作动器。其次,利用激光位移传感器(KEYENCE LK-G150)实时测量悬臂梁结构端部的位移响应,并将其输入至 Quanser 采集板卡。最后,由 PC 主机记录位移响应数据。

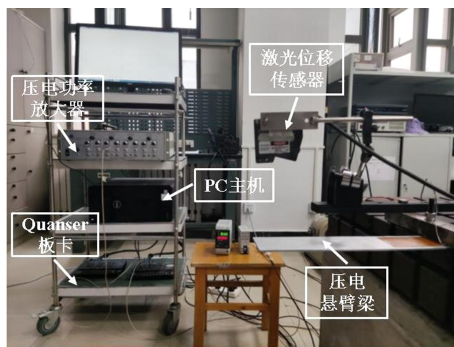


图 5 静态电压驱动特性实验现场

静态电压驱动特性实验工况设置:给 MFC 作动器施加 0~500 V 的静态驱动电压,步进值为 50 V,分别采集不同静态驱动电压下悬臂梁结构端部的位移响应。

与此同时,基于 2.1 节所建立 2 种压电悬臂梁结构耦合有限元模型,采用与实验工况相同的驱动电压序列,利用 ANSYS-APDL 软件的静力学分析模块计算得到悬臂梁结构端部的位移响应,并与实验结果进行对比研究,结果如表 3 所示。

进一步定量分析 2 种压电悬臂梁结构耦合有限

元模型的预测精度,如表 4 所示。可以看出,所建立的三明治耦合有限元模型在静态驱动电压下的平均预测误差仅为 2.37%,相较于均质化耦合有限元模型,预测精度平均提升了 4.30%。

表 3 静态驱动电压下悬臂梁结构端部的位移响应

驱动电压/ V	实验结果/ μm	三明治耦合有限元 模型/μm	均质化耦合有限元 模型/μm
50	19.0	19.6	20.6
100	37.8	39.3	41.3
150	57.4	59.2	62.0
200	76.7	78.8	82.5
250	95.8	98.6	103.0
300	116.6	118.1	123.6
350	136.4	137.9	144.3
400	157.4	159.0	164.7
450	177.2	178.9	185.5
500	196.9	198.7	206.3

表 4 静态驱动电压下耦合有限元模型的预测误差

驱动电压/ V	三明治耦合 有限元模型 相对误差/%	均质化耦合 有限元模型 相对误差/%	精度提升/%
50	3.16	8.42	5.26
100	3.97	9.26	5.29
150	3.14	8.01	4.87
200	2.74	7.56	4.82
250	3.76	7.52	3.76
300	2.92	6.00	3.08
350	1.10	5.79	4.69
400	1.02	4.64	3.62
450	0.96	4.68	3.72
500	0.91	4.77	3.86

将上述对比结果绘制到图 6 中,可以看出,在静态驱动电压下,三明治耦合有限元模型的静态电压驱动特性预测曲线与实验测试曲线吻合良好,由于考虑了交叉铜电极对 MFC 刚度的贡献,实现了很高的预测精度,模型精度优于均质化耦合有限元模型。

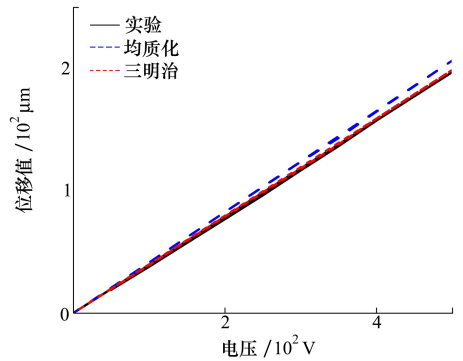


图 6 压电悬臂梁结构静态电压驱动特性曲线

### 2.3 动力学特性分析

本节通过压电悬臂梁结构的动力学特性分析,进一步验证所提基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法的可靠性。

#### 2.3.1 压电悬臂梁结构模态分析

本节采用锤击法测试了压电悬臂梁结构的模态特性,实验现场如图 7 所示。

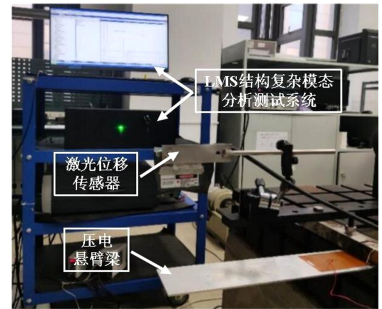


图 7 压电悬臂梁结构模态实验现场

首先,利用 LMS 结构复杂模态分析测试系统建立了几何模型,再采用跑点法测试得到了压电悬臂梁结构的前 4 阶模态频率及振型,如图 8 所示。

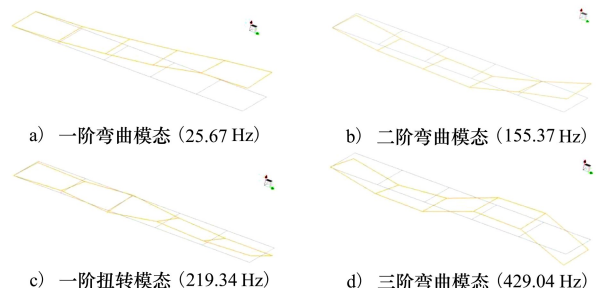


图 8 压电悬臂梁结构模态测试结果

其次,利用 ANSYS-APDL 软件的模态分析模

块,采用 Block Lanczos 方法分别计算 2.1 节所构建的 2 种压电悬臂梁结构耦合有限元模型的前 4 阶模态特性,其中,三明治耦合有限元模型的模态分析结果如图 9 所示,可以看出,其与实验测试结果具有良好的 consistency。

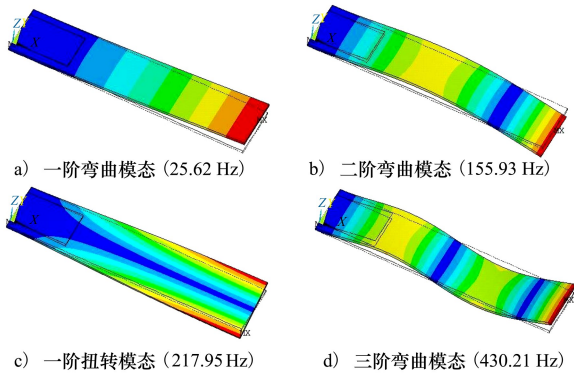


图 9 压电悬臂梁结构模态分析结果

进一步将上述模态分析结果汇总至表 5 可知,三明治耦合有限元模型的模态特性分析结果与实验测试结果吻合良好,各阶模态频率的预测误差均在 1% 以内。而均质化耦合有限元模型由于未能考虑交叉铜电极对 MFC 刚度的贡献,其各阶模态频率低于模态实验结果。

表 5 模态分析对比结果

模态	模态实验	Hz	
		三明治耦合有限元模型	均质化耦合有限元模型
一阶弯曲	25.67	25.62	24.82
二阶弯曲	155.37	155.93	152.49
一阶扭转	219.34	217.95	214.45
三阶弯曲	429.04	430.21	424.18

### 2.3.2 压电悬臂梁结构动态电压驱动特性分析

本节进一步对比研究压电悬臂梁结构在正弦驱动电压和随机驱动电压下的位移响应,实验所用的仪器设备与静态电压驱动特性实验相同。动态电压驱动特性实验工况设置为:正弦驱动电压频率为 25.67 Hz,幅值分别取 100, 200, 300, 400 和 500 V;随机驱动电压取 20~30 Hz 窄带随机信号。

与此同时,利用 ANSYS-APDL 软件的瞬态响应分析模块,设定采样频率为 100 Hz,采样时长为 3 s,并对 MFC 作动器施加与实验工况相同的驱动电压

信号,计算得到压电悬臂梁结构端部的位移响应。

在正弦驱动电压下,待结构振动响应稳定后,对比分析悬臂梁结构端部的稳态位移响应幅值,如表 6 所示,进一步将耦合有限元模型的预测误差汇总至表 7 可知,所建立的三明治耦合有限元模型的平均预测误差仅为 1.21%,相较于均质化耦合有限元模型降低了 3.58%。

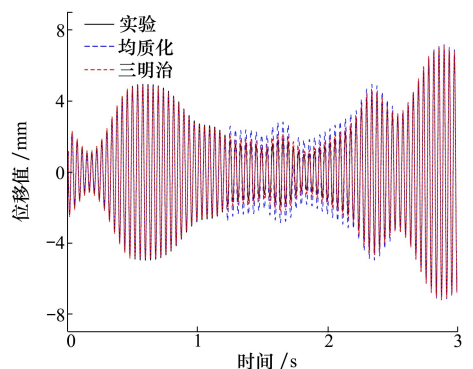
表 6 正弦驱动电压下悬臂梁结构端部的位移响应

驱动电压幅值/V	实验结果/mm	三明治耦合有限元模型/mm	均质化耦合有限元模型/mm
100	0.38	0.38	0.40
200	0.81	0.80	0.85
300	1.24	1.26	1.30
400	1.67	1.70	1.74
500	2.10	2.07	2.20

表 7 正弦驱动电压下耦合有限元模型的预测误差

驱动电压幅值/V	三明治耦合有限元模型	均质化耦合有限元模型	精度提升/%
	相对误差/%	相对误差/%	
100	0.00	5.26	5.26
200	1.23	4.94	3.71
300	1.61	4.84	3.23
400	1.80	4.19	2.39
500	1.43	4.76	3.33

在随机驱动电压下,压电悬臂梁结构端部的位移响应对比曲线如图 10a) 所示,同时将 1.2~2.2 s 局部放大展示在图 10b) 中。由图 10 可知,三明治



a) 压电悬臂梁结构端部的位移响应曲线

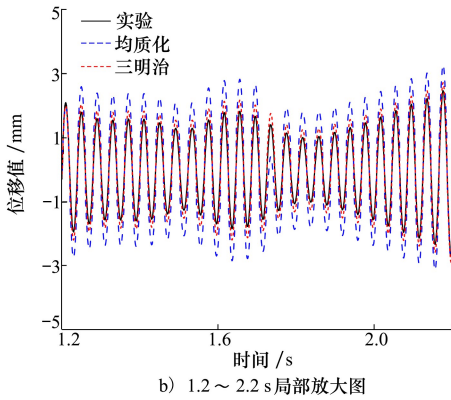


图 10 随机驱动电压下悬臂梁结构端部的位移响应曲线

耦合有限元模型的预测精度明显优于均质化耦合有限元模型。进一步计算分析可得,三明治耦合有限元模型的均方预测误差仅为 7.63%,相较于均质化耦合有限元模型降低了 13.34%,验证了本文所提基于三明治结构的 MFC 等效有限元建模方法的可靠性。

### 3 结 论

针对传统 MFC 有限元建模方法存在计算精度

与计算成本之间的矛盾,本文在均质化建模方法基础上,进一步考虑交叉铜电极对 MFC 刚度的贡献,提出了一种基于“电极层-活性层-电极层”三明治结构的 MFC 有限元建模方法,并利用 ANSYS-APDL 软件对粘贴有 MFC 作动器的悬臂梁结构进行了“压电-结构”耦合有限元建模、数值仿真与实验验证。主要结论如下:

1) 由 MFC 有限元模型的自由应变与阻滞力预测结果可知,所建立的 MFC 三明治模型的预测精度分别达到了 98.47% 和 99.86%,相较于 MFC 均质化模型,预测误差分别降低了 4.35% 和 4.33%,验证了所提基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法的合理性。

2) 由压电悬臂梁结构静/动力学数值仿真与实验验证结果可知,所建立的三明治耦合有限元模型在静态驱动电压下的平均预测误差仅为 2.37%,相较于均质化耦合有限元模型,平均预测精度提升了 4.30%。同时,在正弦驱动电压和随机驱动电压下,所建立的三明治耦合有限元模型的预测误差分别为 1.21% 和 7.63%,明显优于传统均质化耦合有限元模型,进一步验证了所提基于三明治结构的 MFC 有限元建模方法的高效性和可靠性,展现出了良好的工程实用价值和应用潜力。

### 参考文献:

- [1] 王雄,高英山,张顺琦,等. 基于 zig-zag 假设的压电阻尼层合结构机电耦合建模与分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(2): 407-413.  
Wang Xiong, Gao Yingshan, Zhang Shunqi, et al. Electromechanical coupling modeling and analysis of piezoelectric damping laminated structures based on zig-zag hypothesis[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(2): 407-413. (in Chinese)
- [2] 吕胜利,姚磊江,童小燕,等. 复合材料空天结构多目标优化设计方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(6): 713-715.  
Lü Shengli, Yao Leijiang, Tong Xiaoyan, et al. Control-structure integrated optimization design of composite structure with thermo-piezoelectric coupling considered[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(6): 713-715. (in Chinese)
- [3] 杜海波,秦雷,仲超,等. 基于 1-1-3 型压电复合材料水声换能器性能分析[J]. 西北工业大学学报, 2019, 37(2): 386-392.  
Du Haibo, Qin Lei, Zhong Chao, et al. Study on underwater performance of underwater transducer manufactured by 1-1-3 piezoelectric composite[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2019, 37(2): 386-392. (in Chinese)
- [4] Wilkie W K, Bryant R G, High J W, et al. Low-cost piezocomposite actuator for structural control applications[C]// Smart Structures and Material 2000, 2000: 323-334.
- [5] Shahab S, Erturk A. Coupling of experimentally validated electroelastic dynamics and mixing rules formulation for macro-fiber composite piezoelectric structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2017, 28(12): 1575-1588.

- [6] Zhang S Q, Chen M, Zhao G Z, et al. Modeling techniques for active shape and vibration control of macro-fiber composite laminated structures[J]. *Smart Structures and Systems*, 2017, 19(6): 633-641.
- [7] 庞欢, 刘逸茗, 林晔, 等. 压电作动器振动抑制系统可靠性评估及优化设计[J]. *西北工业大学学报*, 2023, 41(6): 1097-1106.  
Pang Huan, Liu Yiming, Lin Ye, et al. Reliability evaluation and optimization design method of piezoelectric actuator vibration suppression system[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2023, 41(6): 1097-1106. (in Chinese)
- [8] Makrovlakni K Z. Investigation of the 3D displacement characteristics for a macro-fiber composite transducer(MFC-P1)[J]. *Materials in Technologies*, 2018, 52(2): 235-239.
- [9] Thien A B, Park G, Farrar C R. Health monitoring of pipeline systems using macro-fiber composite activesensors[J]. *Steel Structures*, 2007, 7: 33-48.
- [10] Mallouli M, Chouchane M. Piezoelectric energy harvesting using macro fiber composite patches[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2020, 234(21): 4331-4349.
- [11] 唐恩凌, 王利, 王睿智, 等. 高速撞击压电陶瓷过程中储能电容对电输出特性的影响研究[J]. *西北工业大学学报*, 2018, 36(5): 949-954.  
Tang Enling, Wang Li, Wang Ruizhi, et al. Influence of the storage energy capacitance on their electrical output characteristics of piezoelectric ceramic during the process of high-velocity impact[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2018, 36(5): 949-954. (in Chinese)
- [12] Lou J, Chen T, Yang Y, et al. Electricity-structure-fluid coupled modelling and experiment of underwater flexible structure with partially distributed macro fiber composites[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2022, 28(3/4): 290-303.
- [13] Deraemaeker A, Nassers H. Numerical evaluation of the equivalent properties of macro of fiber composite transducers using periodic homogenization[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2010, 47(24): 3272-3285.
- [14] 高裕昆, 赵洁, 周晶晶, 等. 压电纤维复合材料智能传感器的有限元预测与器件性能[J]. *物理学报*, 2025, 74(5): 199-208.  
Gao Yukun, Zhao Jie, Zhou Jingjing, et al. Finite element prediction and device performance of piezoelectric fiber composite based smart sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2025, 74(5): 199-208. (in Chinese)
- [15] 李加红, 周静, 沈杰, 等. PZT-5H 基压电纤维复合材料低频传感性能研究[J]. *压电与声光*, 2022, 44(4): 537-542.  
Li Jiahong, Zhou Jing, Shen Jie, et al. Study on low-frequency sensing performance of PZT-5H based macro fiber composite[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, 44(4): 537-542. (in Chinese)
- [16] Steiger K, Mokry P. Finite element analysis of the macro fiber composite actuator: macroscopic elastic and piezoelectric properties and active control thereof by means of negative capacitance shunt circuit[J]. *Smart Materials & Structure*, 2015, 24(4): 1-4.
- [17] 段青放. 基于机器学习的 MFC 压电作动器功能寿命预测方法研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2023.  
Duan Qingfang. Study on the function life prediction of MFC piezoelectric actuator based on machine learning[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2023. (in Chinese)
- [18] 黄丹丹, 陈勇. 压电纤维复合材料有限元模拟及其试验研究[J]. *压电与声光*, 2019, 41(2): 234-240.  
Huang Dandan, Chen Yong. Finite element simulation and experimental study on macro fiber composite[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2019, 41(2): 234-240. (in Chinese)
- [19] 俞红锂, 刘茜, 徐婷婷. 压电纤维复合材料的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2022, 59(10): 975-982.  
Yu Hongli, Liu Qian, Xu Tingting. Research progress of macro fiber composite[J]. *Micro-Nano Electronics Technology*, 2022, 59(10): 975-982. (in Chinese)
- [20] Trindade M A, Benjeddou A. Finite element homogenization technique for the characterization of d15 shear piezoelectric macro-fibre composites[J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(7): 075012.
- [21] Latalali J. Modelling of macro fiber composite piezoelectric active elements in ABAQUS system[J]. *Maintenance and Reliability*, 2011, 52(4): 72-78.

# Finite element modeling and experimental validation of macro-fiber composite with sandwich structure

Chen Qingqian<sup>1,2</sup>, Li Weiguang<sup>1</sup>, Zhang Ziyao<sup>1</sup>, Cao Panwen<sup>3</sup>, He Shun<sup>3</sup>

1.School of Sciences, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
2.School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
3.School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

**Abstract:** Macro-fiber composite (MFC) boasts good flexibility, strong environmental adaptability, and high driving force, which has driven its extensive adoption in fields like aerospace and navigation. To resolve the conflict between computational accuracy and cost in traditional MFC finite element modeling methods, a sandwich structure based MFC finite element modeling method is proposed. Firstly, considering the contribution of cross copper electrodes to the stiffness of MFC, a finite element modeling method for MFC based on the sandwich structure of "electrode layer-active layer-electrode layer" is proposed. Then, the ANSYS-APDL software is used to establish the sandwich finite element model of MFC, and its free strain and blocking force under actual working conditions are calculated to verify the rationality of the established finite element model. Finally, a "piezoelectric-structure" coupled finite element modeling of a cantilever beam with an attached MFC actuator is established, followed by numerical simulation and experimental validation. Results reveal that compared to the traditional homogenization finite element modeling method, the proposed sandwich structure based finite element modeling method markedly enhances the simulation accuracy of MFC driving characteristics. Moreover, it effectively cuts computational costs compared to the micro-scale fine-grained finite element modeling method, making it highly valuable for practical engineering applications.

**Keywords:** macro-fiber composite; sandwich structure; finite element method; modal analysis

**引用格式:**陈青乾, 李伟光, 张子尧, 等. 基于三明治结构的压电纤维复合材料有限元建模与实验验证[J]. 西北工业大学学报, 2026, 44(1): 160-168.

Chen Qingqian, Li Weiguang, Zhang Ziyao, et al. Finite element modeling and experimental validation of macro-fiber composite with sandwich structure [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2026, 44(1): 160-168. (in Chinese)