

局部粘贴压电宏纤维致动器的水下弹性结构 机-电-液耦合振动特性

顾 震¹, 娄军强^{1,2}, 杨依领¹, 陈特欢¹, 陈海荣¹, 魏燕定²

(1. 宁波大学机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江大学浙江省先进制造技术重点研究实验室, 浙江 杭州 310027)

摘要: 建立了局部粘贴压电宏纤维致动器 (Macro Fiber Composite, MFC) 的水下弹性结构机-电-液耦合振动模型, 并开展了 MFC 激励下的水下弹性结构的频率响应实验。采用混合规则法得到了 MFC 等效体积单元的等效机电耦合参数。基于假设模态法推导了局部粘贴 MFC 的欧拉-伯努利梁的分段归一化振型函数。结果显示粘贴 MFC 致动器的主动变形段末端的变形量仅为被动变形段末端的 3%, 局部粘贴 MFC 致动器弹性结构的模态振型较匀质等截面梁结构发生了明显变化。建立了包含 MFC 致动器等效驱动力矩、周围流体水动力载荷及弹性结构振动特性的水下弹性结构机-电-液耦合振动模型。基于搭建的实验平台, 测试得到了 MFC 不同激励频率下水下弹性结构的频率响应特性, 实验结果表明: 耦合动力学模型的理论预测结果与结构实际振动的幅频特性和相频特性基本一致, 证明了所建立机-电-液耦合振动模型的有效性。

关键词: 水下弹性结构; 机-电-液耦合; 水动力; 压电宏纤维; 局部粘贴

中图分类号: O326; TP241.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2022)02-0387-10

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.02.014

引 言

随着人类探索海洋步伐的不断加快及“海洋强国”战略的提出, 具有轻质灵活、操作方便且能耗低等优点的弹性结构被广泛应用于智能仿生水下运动装置、洋流能量采集、海洋微纳器件传感检测以及海底结构健康监测等诸多领域^[1-2]。虽然已有研究人员对真空或空气中弹性结构的振动特性开展了充分研究, 并取得了一定成果^[3]。但是, 水下弹性结构与周围流体的流固耦合作用机制非常复杂, 黏性流体环境中弹性结构的振动响应特性一直是流固耦合领域的研究热点, 引起国内外学者的广泛关注^[4]。

压电致动器作为智能致动器的代表, 具有分辨率高、响应速度快且动态特性好的优点, 成功应用于精密弹性结构的变形控制和振动主动抑制中^[5]。基于压电致动的原子力显微镜 (Atomic Force Microscopy, AFM) 弹性梁的多模态振动特性, Michael 等^[6]扫描得到了被测器件的微观形貌。Mora-

di-Dastjerdi 等^[7]提出了一种压电致动的新型复合薄膜微泵结构, 实现了压电微泵流速和背压的精密控制。王晓宇等^[8]基于多组并联压电致动器的同步开关阻尼控制技术实现了空间弹性天线展开臂的半主动振动控制。为了克服传统压电陶瓷晶片脆性大、耐冲击性能差且弯曲半径小的缺点, 美国 NASA Langley 中心基于指交叉电极和复合材料技术提出了新型纤维基压电材料——压电宏纤维复合材料 MFC。MFC 具有优异的柔韧性、较高的变形能力和较好的防水性能, 尤其适合水下智能弹性结构的变形控制。安方等^[9]利用 MFC 致动器主动抑制水下圆柱薄壳的弹性振动, 降低了所提出水下弹性结构的声辐射和噪声。以 MFC 双晶片悬臂梁为动力源, Cen 等^[10]设计了一种 MFC 致动的水下仿生机器鱼, 其游速可达 7.5 cm/s (0.31 BL/s)。Lou 等^[11]实验测得了谐振式 MFC 致动仿生推进器的水下振动特性, 并数值分析了其摆动过程中周围流场的变化情况。证明了 MFC 致动的弹性结构在水下仿生机器人和精密驱动领域的巨大优势和潜在应用价值。

收稿日期: 2020-08-09; **修订日期:** 2021-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51975517, 52075273, 51805276); 浙江省自然科学基金资助项目 (LY20E050007); 浙江省省属高校基本科研业务费专项资金资助项目 (SJLY2021014); 宁波市自然科学基金资助项目 (2019A610112)。

在水下弹性结构动态响应特性的研究中,如何确定流体对弹性结构的水动力载荷一直是研究难点。赵立波等^[12]建立了悬臂梁与流体的耦合振动微分方程,得到悬臂梁谐振频率与流体密度的函数关系。针对匀质矩形截面的水下 AFM 悬臂梁模型, Van Eysden 等^[13]建立了水动力函数的显式解析式,并分析了水下悬臂梁的频响特性。Aureli 等^[14]通过 CFD 仿真对 Sader 所提的水动力函数进行修正,并研究了水下匀质矩形截面悬臂梁大摆幅下的稳定振动响应。胡璐等^[15]基于 Euler-Bernoulli 梁理论,对矩形梁水动力函数进行修正,并通过外界激励对水动力函数进行验证。但是,以上工作主要集中在外界激励下的水下弹性结构振动特性。而对于智能水下弹性结构而言,其振动由与结构集成为一体的智能致动器主动激励产生。基于描述流体动力载荷的 Morison 半经验模型, Shahab 等^[16]建立了水下 MFC 双晶片梁的前两阶耦合振动模型。然而,由于结构功能及实际工况要求,致动器的尺寸和形状往往与被控弹性结构存在一定差异。Yeh 等^[17]仿真分析了在不同主/被动比下局部粘贴压电致动器的弹性板结构的水下摆动特性,指出被动变形部分的引入可以提高水下弹性结构的摆动速度和效率。但智能致动器的引入导致智能水下弹性结构的结构特性与匀质等截面弹性结构存在差异;且智能材料驱动器通过自身连续变形产生内部弯矩驱动弹性基体实现变形运动,这与文献[12-14]中水下弹性结构在外界激励下变形具有明显不同。因此,针对局部粘贴 MFC 致动器的水下弹性结构,考虑 MFC 致动器的多层复合结构及周围流体的水动力载荷对弹性结构振动特性的影响,分析整个智能弹性结构的机-电-液耦合振动特性,对水下智能弹性结构的性能分析和工程应用具有重要意义和价值。

基于 MFC 的复合结构采用混合规则法得到了等效体积单元的等效结构和介电参数。基于欧拉-伯努利模型,采用假设模态法计算得到局部粘贴 MFC 致动器弹性结构的分段归一化振型函数表达式。计算得到 MFC 致动器的等效驱动力矩,建立水动力函数表达式,推导得到了局部粘贴 MFC 致动器的水下弹性结构机-电-液耦合动力学模型。最后搭建了实验平台,开展了所提出结构在 MFC 驱动下的空气和水下谐振特性实验。

1 MFC 致动器的基本结构及等效参数求解

MFC 是由美国 NASA 的 Langley 中心研发的

新型压电纤维基复合材料。MFC 按照一定的组分比例和空间分布方式将矩形截面粗压电纤维和树脂类聚合物基体胶合在一起,同时将指交叉电极蚀刻在包铜聚酰亚胺薄膜上,其结构示意图和实物如图 1 和 2 所示。与传统的压电陶瓷晶片相比,树脂类聚合物基体的保护作用克服了压电陶瓷在脆性方面的缺陷,使得整个复合结构具有较高的强度和柔韧性。指交叉电极技术充分利用了纵向压电常数 d_{33} ,大大增加了压电纤维与指交叉电极之间的接触面积,从而显著提高了外加电场的利用效率,导致 MFC 在特定方向上具有更高的驱动性能和致动能力^[18]。

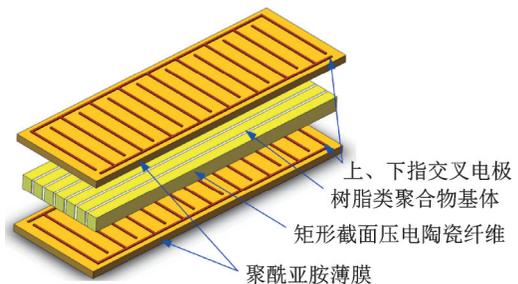


图 1 MFC 结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the MFC laminate



图 2 MFC 实物图 (型号: 2814-P1)

Fig. 2 Picture of an MFC laminate (Type: 2814-P1)

MFC 致动器 (d_{33} 模式) 的极化方向沿着纤维长度方向,在指交叉电极的驱动电压下可以产生较大的驱动力和变形位移。但是压电陶瓷本身的高阻抗特性导致纤维内部电场强度分布的非均匀性。压电纤维内部的电场线曲率严重依赖于两个电极之间的距离,其分布示意图如图 3 所示。

由于 MFC 内部电场的非均匀性及 MFC 的复杂多相结构:包括主动变形体压电纤维及被动变形

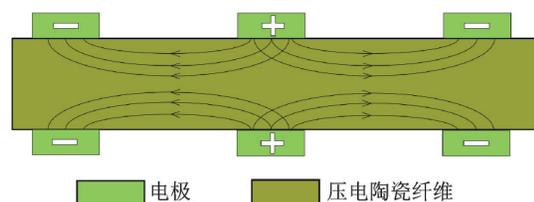


图 3 指交叉电极下压电纤维内部的电场线分布示意图 (d_{33} 模式)

Fig. 3 Schematic distribution of the electric field lines in MFC with interdigitated electrode (d_{33} mode)

体树脂类聚合物基体如图 4 所示,基于标准压电陶瓷参数的直接分析法不能准确获得 MFC 致动器的弹性系数及介电参数,故此处采用 Deraemaeker 等^[19]提出的混合规则法确立 MFC 结构的等效机电耦合特性参数。基于指交叉电极在压电纤维长度方向上周期分布的结构特点,截取一对相邻异性电极之间的复合物作为代表结构单元(Representative Volume Element, RVE)进行研究,图 4 所示 RVE 在 d_{33} 模式下的线性本构方程为:

$$\begin{cases} \sigma_3 = c_{33,r}^E \epsilon_3 - e_{33,r} E_3 \\ D_3 = e_{33,r} \epsilon_3 + \epsilon_{33,r}^S E_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中 σ_3 和 ϵ_3 表示 RVE 应力及应变; D_3 和 E_3 为 RVE 内部的电位移和电场强度; $c_{33,r}^E$, $\epsilon_{33,r}^S$ 和 $e_{33,r}$ 分别为 RVE 等效弹性模量、在恒应变下的介电常数和压电应变常数。

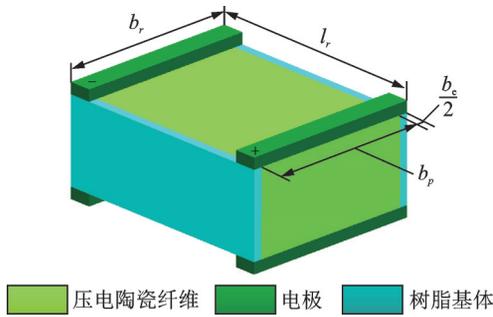


图 4 RVE 结构图(d_{33} 模式)

Fig. 4 Schematic of RVE (d_{33} mode)

基于混合规则法得到图 4 所示 RVE 等效弹性模量、压电常数及介电常数表达式:

$$\begin{cases} c_{33,r}^E = \alpha c_{33,p}^E + \beta c_{33,e}^E \\ d_{33,r} = \frac{\alpha d_{33,p} c_{33,p}^E}{c_{33,r}^E} \\ \epsilon_{33,r}^S = \alpha \epsilon_{33,p}^T + \beta \epsilon_{33,e}^T - d_{33,r}^2 c_{33,r}^E \end{cases} \quad (2)$$

式中 变量下标 r, p 和 e 分别表示 RVE、压电纤维和树脂基体;上标 T 表示在恒应力条件下。 α 和 β 分别为代表 RVE 内压电纤维和树脂基体所占的体积百分比,其具体数值通过超景深显微镜拍摄 MFC 的平面数字图像获得,如图 5 所示。测量得到 MFC 致动器(M-2814-P1,美国 Smart materials 公司)中结构成分的基本参数如表 1 所示。

基于混合规则法,根据压电陶瓷和环氧树脂的基本参数和体积成分,利用式(2)计算得到 RVE 等效参数如表 2 所示。

基于得到的 RVE 等效特征参数及 MFC 的平面数字图像,得到每片 MFC 致动器宽度方向上有效 RVE 的数量 M 和机电耦合系数 λ 为^[20]:

$$M = \frac{b_m}{b_r}, \quad \lambda = M d_{33,r} c_{33,r}^E \frac{A_e}{l_r} h_{pc} \quad (3)$$

式中 b_m 表示 MFC 致动器的致动宽度, A_e 表示 RVE 有效截面积, h_{pc} 表示厚度方向上压电陶瓷纤维中心位置到参考面的距离。

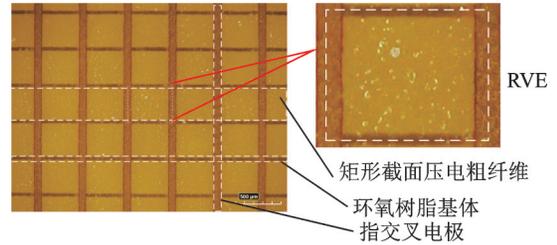


图 5 显微镜下 MFC 的平面数字图像(M-2814-P1)

Fig. 5 Digital image of the planar surface of the MFC actuator under microscope (M-2814-P1)

表 1 RVE 基本尺寸参数表

Tab. 1 Geometric parameters of the RVE

$\alpha/\%$	$\beta/\%$	$b_p/\mu\text{m}$	$b_e/\mu\text{m}$	$b_r/\mu\text{m}$	$l_r/\mu\text{m}$
90.2	9.8	345.4	37.4	382.8	480.7

表 2 RVE 等效特征参数值

Tab. 2 Equivalent parameters of the RVE

	c_{33}^E/GPa	$d_{33}/(\text{pm}\cdot\text{V}^{-1})$	$\epsilon_{33}^T/(\text{nF}\cdot\text{m}^{-1})$	$\epsilon_{33}^S/(\text{nF}\cdot\text{m}^{-1})$
压电陶瓷	48.30	440	16.38	7.2
环氧树脂	3.10	—	3.763×10^{-2}	—
RVE	43.87	436.9	—	6.4

2 局部粘贴 MFC 致动器的水下弹性结构机-电-液耦合振动模型

局部粘贴 MFC 致动器的弹性结构模型如图 6 所示。一对 MFC 驱动器对称地粘贴在轻质量弹性纯铝材料 Al1106 制成的弹性梁上下表面。整个结构完全沉浸在液体环境中。

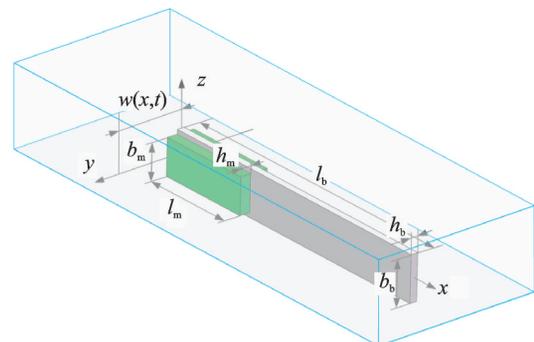


图 6 局部粘贴 MFC 致动器的弹性结构示意图

Fig. 6 Schematic of the elastic structure with partially bonded MFC

在驱动电压的作用下, MFC 致动器将沿着弹性结构长度方向产生伸缩变形, 进而带动弹性结构产生弯曲变形。考虑到弹性结构周围水动力学载荷的影响, 建立水下弹性结构振动的机-电-液耦合振动偏微分方程为:

$$K(x) \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} + m(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c_v \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} = M(x, t) + \Gamma(x, t) \quad (4)$$

式中 $K(x)$ 为距固定端 x 处截面的等效抗弯刚度, $m(x)$ 为 x 处截面的等效单位长度质量, c_v 为弹性结构的阻尼系数, $\Gamma(x, t)$ 为 x 处截面结构所受水动力学载荷。 $M(x, t)$ 为 MFC 致动器的驱动弯矩, 其表达式为:

$$M(x, t) = \lambda \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x - l_m)}{dx} \right] V(t) \quad (5)$$

式中 $\delta(x)$ 表示狄拉克函数, l_m 为 MFC 致动长度, $V(t)$ 表示施加在 MFC 致动器上的驱动电压。

2.1 粘贴 MFC 致动器的弹性结构自由振动模型

为了得到局部粘贴 MFC 致动器弹性结构的模态和振型, 暂不考虑水动力和 MFC 驱动力矩的影响, 首先对自由振动状态下粘贴 MFC 致动器的弹性结构进行研究。由于弹性基体为细长体形式, 可将其视为欧拉-伯努利梁模型。采用变量分离法, 分别考虑主动段和被动段两段的自由振动模态振型函数, 得到:

$$w(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \Phi_i(x) q_i(t) = \{ \Phi^a(x) [H(x) - H(x - l_m)] + \Phi^s(x) [H(x - l_m) - H(x - l_b)] \} q(t) \quad (6)$$

式中 $H(x)$ 为赫维赛德函数; l_b 为基体长度; $\Phi_i(x)$ 为第 i 阶模态振型函数, $q_i(t)$ 为广义模态坐标, 下标 'i' 表示模态阶次。 $\Phi(x) = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i, \dots]$ 为模态振型函数矢量, $q(t) = [q_1, q_2, \dots, q_i, \dots]^T$ 为广义模态坐标矢量。上标字母 'a' 和 's' 分别代表主动变形段和被动变形段。模态振型函数的表达式为:

$$\begin{cases} \Phi_i^a(x) = A_i^a \sin \beta_i^a x + B_i^a \cos \beta_i^a x + C_i^a \sinh \beta_i^a x + D_i^a \cosh \beta_i^a x \\ \Phi_i^s(x) = A_i^s \sin \beta_i^s x + B_i^s \cos \beta_i^s x + C_i^s \sinh \beta_i^s x + D_i^s \cosh \beta_i^s x \end{cases} \quad (7)$$

式中 β_i 为特征频率; A_i, B_i, C_i 和 D_i 为第 i 阶模态振型的特征系数, 主动变形段和被动变形段参数值由相应的边界条件和连续性条件确定。采用一端固定、一端自由的悬臂边界条件如下:

$$\begin{cases} x=0, & \Phi_i^a(0)=0, & \frac{d\Phi_i^a(0)}{dx}=0 \\ x=l_b, & \frac{d^2\Phi_i^s(l_b)}{dx^2}=0, & \frac{d^3\Phi_i^s(l_b)}{dx^3}=0 \end{cases} \quad (8)$$

主动变形段左侧与被动变形段右侧的模态振型函数、模态振型转角、弯矩和剪力相等。因此, 弹性结构的主动变形段与被动变形段在 l_m 处的一致连续性条件为:

$$\begin{cases} \Phi_i^a(l_m) = \Phi_i^s(l_m) \\ \frac{d\Phi_i^a(l_m)}{dx} = \frac{d\Phi_i^s(l_m)}{dx} \\ (E_m J_m + E_b J_b) \frac{d^2\Phi_i^a(l_m)}{dx^2} = E_b J_b \frac{d^2\Phi_i^s(l_m)}{dx^2} \\ (E_m J_m + E_b J_b) \frac{d^3\Phi_i^a(l_m)}{dx^3} = E_b J_b \frac{d^3\Phi_i^s(l_m)}{dx^3} \end{cases} \quad (9)$$

由于局部粘贴 MFC 致动器的弹性结构主、被动变形段的特征频率 β_i^a 和 β_i^s 统一于弹性结构的自由振动频率, 满足如下方程:

$$\beta_i^s = \sqrt[4]{\frac{(E_m J_m + E_b J_b)(\rho_b A_b)}{(2\rho_m A_m + \rho_b A_b)(E_b J_b)}} \beta_i^a \quad (10)$$

式中 E, J, ρ 和 A 分别表示结构弹性模量、截面极惯性矩、密度和截面面积; 下标 m 和 b 分别代表 MFC 致动器和弹性基体。

将边界条件式(8)、连续性条件式(9)及振型函数式(6)代入弹性结构的自由振动方程, 得到关于弹性结构振型函数系数的特征方程矩阵, 其简化形式如下:

$$\mathbf{K}_{i(8 \times 8)} \mathbf{P}_{i(8 \times 1)} = 0 \quad (11)$$

式中 $\mathbf{K} = \mathbf{K}(\beta_i^a)$ 为特征系数矩阵, \mathbf{P} 代表模态振型系数。由于矩阵仅含一个未知数 β_i^a , 令特征系数矩阵 \mathbf{K} 的行列式为零, 即可得到弹性结构的各阶固有频率以及主、被动变形段的特征频率。

对弹性结构振型函数进行模态质量归一化处理:

$$\int_0^{l_m} m(x) \Phi_i^a(x) \Phi_j^a(x) dx + \int_{l_m}^{l_b} m(x) \Phi_i^s(x) \Phi_j^s(x) dx = \delta_{ij} \quad (12)$$

式中 δ_{ij} 为克罗内克函数, 当 i 与 j 相等时 $\delta_{ij} = 1$, 其余时刻其值均为 0。

2.2 水下弹性结构的水动力载荷求解

在局部平坦且低展弦比的前提下, 弹性结构所受水动力载荷的求解可以简化为一个二维平面问题。考虑到水下弹性结构的一阶振动模态在其振动特性中占据主导地位, 针对弹性结构的低阶振动模态, 其振动波长远大于自身变形量, 故认为变形过程中的水下弹性结构是局部平整的。由于局部粘贴 MFC 致动器的水下弹性结构振动波长远大于其长

度,其振动引起周围流体的水动力载荷作用可以用半经验 Morison 公式表达^[16]:

$$\Gamma(x, t) = -\frac{\pi}{4} c_m \rho_w b_b^2 \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} - \frac{1}{2} \rho_w b_b c_d \left| \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \right| \left| \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} \right| \quad (13)$$

式中 $\Gamma(x, t)$ 为弹性结构所受水动力载荷, ρ_w 为流体密度, b_b 为弹性结构水下振动等效宽度, 此处即为基体宽度, c_m 和 c_d 分别代表周围流体对弹性结构的附加质量系数和流体阻尼系数, 二者的解析表达式为:

$$c_m = \frac{\psi^2 - 0.701\psi + 0.3745}{\psi^2 - 1.111\psi + 2.637} \quad (14)$$

$$c_d = \frac{\psi^2 + 0.1432\psi + 0.5618}{0.04983\psi^2 - 0.03946\psi + 0.2674} \quad (15)$$

式中 ψ 为弹性结构长宽比。

2.3 水下弹性结构的机-电-液耦合振动模型

将式(7)和(13)~(15)代入水下弹性结构振动的机-电-液耦合振动方程式(4), 对得到的方程两边同乘 Φ_j , 并沿着弹性结构长度方向积分, 重新整理可得水下弹性结构的机-电-液耦合振动模型:

$$\left\{ 1 + \frac{\pi}{4} c_m \rho_w b_b^2 \left[\int_0^{l_m} [\Phi_j^a(x)]^2 dx + \int_{l_m}^{l_b} [\Phi_j^s(x)]^2 dx \right] \right\} \ddot{q}_j + 2\xi_j \omega_j \dot{q}_j + \frac{1}{2} \rho_w b_b c_d \cdot \sum_{i=1}^{\infty} \left[\int_0^{l_m} \Phi_j^a(x) \Phi_i^a(x) \dot{q}_i \Phi_i^a(x) \left| \dot{q}_i \right| dx + \int_{l_m}^{l_b} \Phi_j^s(x) \Phi_i^s(x) \dot{q}_i \Phi_i^s(x) \left| \dot{q}_i \right| dx \right] + \omega_j^2 q_j = \int_0^{l_m} \Phi_j^a(x) \lambda \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-l_m)}{dx} \right] V(t) dx \quad (j=1, 2, \dots) \quad (16)$$

式中 ξ_j 为第 j 阶结构模态阻尼比, ω_j 为真空中弹性结构的第 j 阶无阻尼固有频率。

需要指出的是: 从式(16)中可以看出, 弹性结构的阻尼项与广义速度绝对值 $|\dot{q}_i|$ 相关, 造成水下弹性结构耦合振动模型中存在广义速度平方项, 因此水下弹性结构振动行为具有时变非线性。从建立的水下弹性结构耦合振动模型中可以看出: 局部粘贴 MFC 致动器的水下弹性结构振动行为是 MFC 致动器的机电耦合效应、弹性结构自身的弹性振动特性与周围流体水动力效应耦合作用的结果, 具有显著的机-电-液耦合特性。且周围流体通过附加质量效应和流体阻尼效应改变了水下弹性结构振动方程中的质量项和阻尼项, 如式(16)所示, 且具有强烈的非线性耦合特性。

3 数值计算

在实际情况下精确获取水下弹性结构的无穷阶振动模态是不可能的。所以在保证精度的情况下, 通过模态截断法截取部分模态, 得到水下弹性结构的振动特性。考虑到用做推进器的水下弹性结构固有频率大多集中在 10 Hz 左右, 故本文研究关注的频带集中在水下弹性结构一阶固有频率附近, 在确保精度的情况下, 通过模态截断法截取一阶模态, 此时式(16)简化为:

$$\left\{ 1 + \frac{\pi}{4} c_m \rho_w b_b^2 \left[\int_0^{l_m} [\Phi_1^a(x)]^2 dx + \int_{l_m}^{l_b} [\Phi_1^s(x)]^2 dx \right] \right\} \ddot{q}_1 + 2\xi_1 \omega_1 \dot{q}_1 + \frac{1}{2} \rho_w b_b c_d \left[\dot{q}_1 \left\{ \int_0^{l_m} [\Phi_1^a(x)]^2 |\Phi_1^a(x)| dx + \int_{l_m}^{l_b} [\Phi_1^s(x)]^2 |\Phi_1^s(x)| dx \right\} \dot{q}_1 + \omega_1^2 q_1 \right] = \int_0^{l_m} \Phi_1^a(x) \lambda \left[\frac{d\delta(x)}{dx} - \frac{d\delta(x-l_m)}{dx} \right] V(t) dx \quad (17)$$

MFC 致动弹性结构基本结构尺寸如表 3 所示。

MFC 致动器采用美国 Smart Materials 的 M-2814-P1。基于 MFC 致动器和弹性构件基本参数, 选取缩放比例系数 ζ 和无量纲参数 γ 为:

$$\zeta = \frac{1}{\Phi_1^s(l_b)}, \quad \gamma = \frac{x}{l_b} \quad (18)$$

计算得到局部粘贴 MFC 致动器的弹性结构一阶振动模态下的主、被动变形段归一化一阶无量纲振型为:

$$\Phi_{\text{norm}}^a(\gamma) = 0.049 \sin 30.75\gamma - 0.070 \cos 30.75\gamma - 0.049 \sinh 30.75\gamma + 0.070 \cosh 30.75\gamma \quad (19)$$

$$\Phi_{\text{norm}}^s(\gamma) = -0.199 \sin 47.97\gamma - 0.584 \cos 47.97\gamma - 1.170 \sinh 47.97\gamma + 1.220 \cosh 47.97\gamma \quad (20)$$

局部粘贴 MFC 致动器的弹性结构的无量纲振型、振型转角、弯矩和剪力如图 7 所示。从图 7(a) 所示的局部粘贴 MFC 致动器的弹性结构一阶无量纲振型曲线中可以看出: 粘贴 MFC 致动器的主动变形部分的模态变形位移远小于被动变形部分, MFC 致动器末端 l_m 处的无单位模态位移为 0.03, 仅为弹性结构末端 l_b 处模态变形位移的 3%。而匀质等截面弹性结构 l_m 处的无量纲模态位移达到了 0.19。局部粘贴 MFC 致动器的弹性梁结构的振型曲线较匀

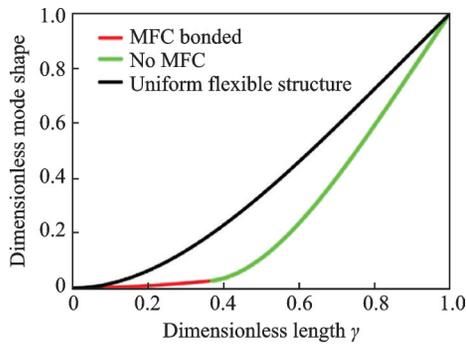
表3 弹性结构和MFC致动器参数表

Tab.3 Parameters of the elastic structure and MFC actuator

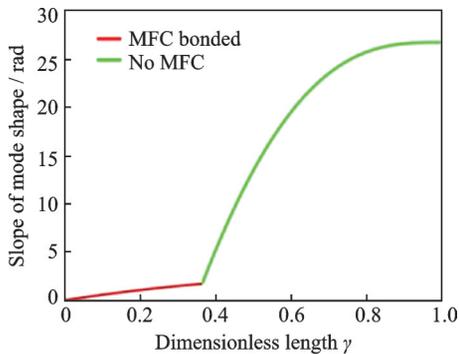
参数	符号	单位	数值
基体弹性模量	E_b	GPa	71.2
基体密度	ρ_b	kg/m ³	2700
基体长度	l_b	mm	77.0
基体宽度	b_b	mm	20.1
基体厚度	h_b	mm	0.20
MFC弹性模量	E_m	GPa	48.3
MFC体密度	ρ_m	kg/m ³	5440
MFC致动长度	l_m	mm	28
MFC致动宽度	b_m	mm	14
MFC厚度	h_m	mm	0.3
MFC长度	l_m	mm	38
MFC宽度	b_m	mm	20

质等截面梁产生了明显变化。

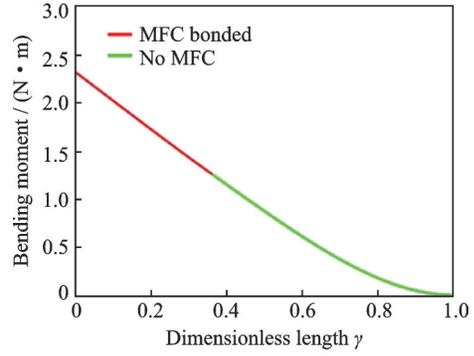
基于表3中结构参数,计算得到图6所示弹性结构在空气和水下的一阶固有频率分别为403.86 rad/s (64.31 Hz) 和 74.23 rad/s (11.82 Hz)。在 $400 \cdot \sin 403.86t$ 谐振电压信号激励下,图8(a)给出了MFC致动弹性结构在空气中的振动响应。作为对比,图8(b)给出了在 $400 \sin 74.23t$ 谐振信号激励下,MFC致动弹性结构的水下振动响应。从图8的对比结果以及水下弹性结构的机-电-液耦合振动方程式(16)中可以看出,流体的水动力载荷对弹性结构



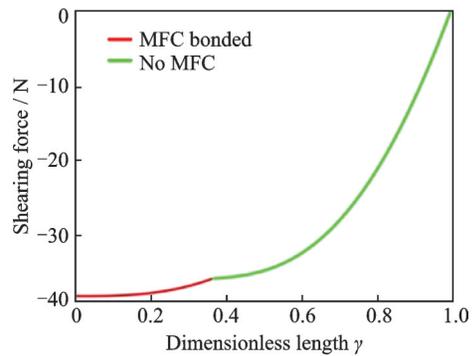
(a) 无量纲振型
(a) Dimensionless mode shape



(b) 振型转角
(b) Slope of the mode shape



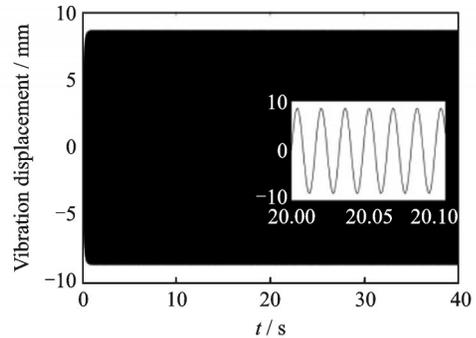
(c) 弯矩
(c) Bending moment



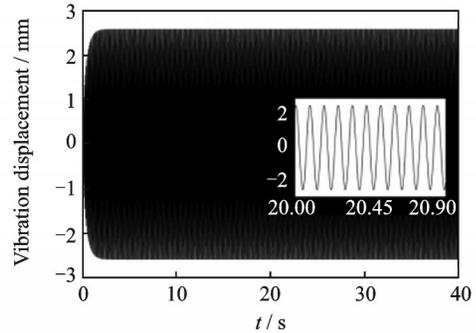
(d) 剪力
(d) Shearing force

图7 分段悬臂梁的变形与载荷分布

Fig.7 Deformation and load distribution of the segmented cantilever



(a) 空气中弹性结构末端振动响应
(a) In-air vibration responses of the tip of elastic structure



(b) 水下弹性结构末端振动响应
(b) Underwater vibration responses of the tip of elastic structure

图8 MFC致动弹性结构末端的空气中和水下谐振情况对比
Fig.8 Comparison of the harmonic vibrations of the tip of MFC-actuated elastic structure in air and fluids

的质量矩阵和阻尼矩阵都产生了重要影响,导致弹性结构的水下固有频率显著下降,同时造成弹性结构的水下谐振振幅也远小于空气中对应情况,其末端谐振振幅由空气中的 8.64 mm 减小为水下的 2.67 mm。

4 测试系统搭建及实验结果

实验中采用高剪切强度胶水 3M-DP460 将 MFC 致动器(MFC-2814-P1)对称地粘贴在弹性梁的两侧,放入真空干燥箱静压 6 个小时(保持温度 80 °C,压强 0.06 MPa)以获得均匀薄粘结层,并用防水胶 3M-DP490 对连接触点进行防水处理。搭建 MFC 致动的弹性结构水下测控系统如图 9 所示,弹性结构放置于 760 mm×460 mm×500 mm 的水箱中。弹性结构沿水箱长度方向放置在水箱中间。水箱宽度远大于弹性结构的振动幅值,因此可以忽略壁面效应。测试过程中,PC 机发出的驱动信号经嵌在 cDAQ 机箱(NI cDAQ-9178)的 D/A 模块转换为模拟电压信号,该电压信号通过功率放大器(Trek PZD700A)放大 200 倍后输出到 MFC 致动器上,从而驱动弹性结构产生振动。同时,利用水平放置在弹性构件末端的激光位移传感器(Keyence LK-G80,分辨率 0.15 μm)实时获取其末端振动位移,该信号经调理后通过 USB 口传输到 PC 机,整个测试系统通过 LabVIEW 软件平台完成。

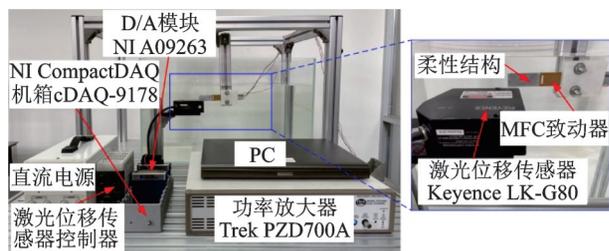


图 9 实验装置图

Fig. 9 Photograph the experimental setup

为了获取 MFC 致动弹性结构末端在空气中的振动响应,首先对 MFC 致动器施加正弦扫频信号(峰峰值 800 V,频率范围 0.1~80 Hz),整个扫频过程持续 40 s。实验测得空气中弹性结构的振动响应如图 10(a)所示,并对得到的振动响应进行 FFT 分析,得到其频域响应如图 10(b)所示。从图中可以看出:在 MFC 致动器作用下,空气中弹性结构的实验扫频响应与数值计算结果高度吻合,其空气中一阶固有频率约为 402.67 rad/s (64.12 Hz),与理论计算结果基本一致。

在峰峰值电压 800 V、频率 64.12 Hz 的正弦信

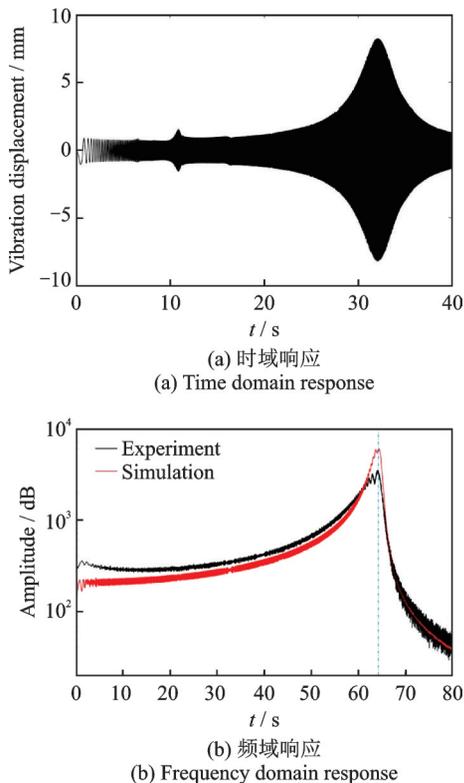


图 10 空气中弹性结构末端扫频激励下的振动响应

Fig. 10 Vibration responses of the tip of elastic structure in air subjected to a chirp excitation

号激励下,MFC 致动弹性结构在空气中的谐振响应如图 11 所示。从图中看出弹性结构末端的最大振幅为 8.26 mm,略小于理论计算值 8.64 mm。这可能是由于环氧树脂粘结层的影响,削弱了 MFC 致动器的致动能力和驱动效果。

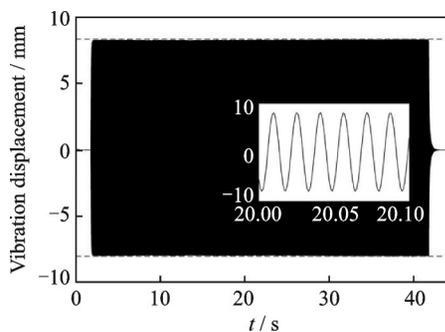


图 11 空气中弹性结构末端的谐振响应

Fig. 11 Harmonic response of the tip of elastic structure in air

为了测试 MFC 致动弹性结构的水下振动特性,施加峰峰值 800 V、频率范围 0.1~15 Hz 的正弦扫频信号到 MFC 致动器上,持续时间 40 s。实验测得弹性结构末端的水下扫频振动响应如图 12(a)所示,相应的 FFT 处理结果如图 12(b)所示。从水下弹性结构扫频响应对比图可以看出:虽然仿真与实验结果中弹性结构的水下一阶固有频率位置基本一致,但是二者在低频段的频率响应曲线存在着显著

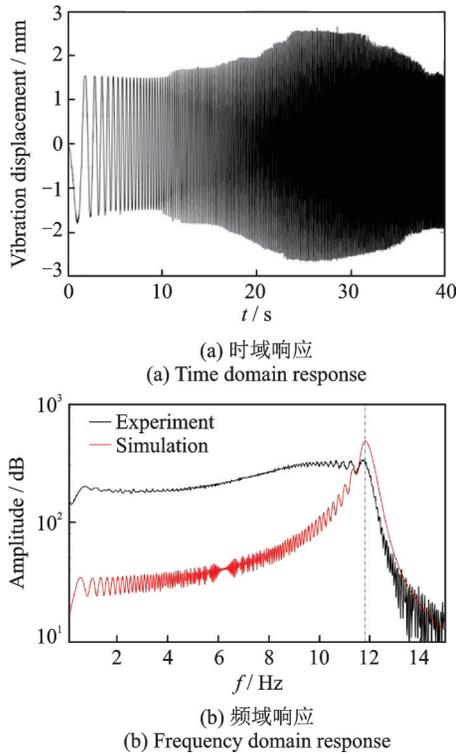


图12 水下弹性结构末端的扫频振动响应

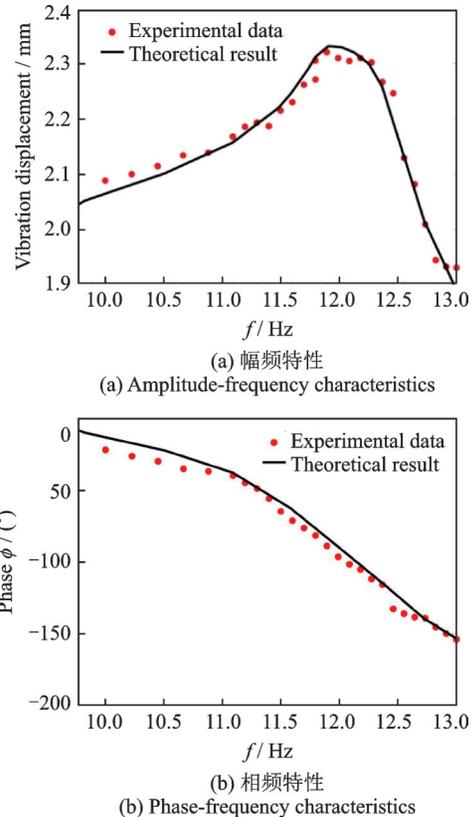
Fig. 12 Underwater vibration responses of the tip of MFC-actuated elastic structure subjected to a chirp excitation

差别。这是由于扫频过程中激励频率连续变化,使得弹性结构周围流体处于不稳定流动状态,从而导致弹性结构振动过程中所受水动力载荷时刻发生变化。因此扫频测试只能粗略地获取弹性结构的水下一阶固有频率范围,不能准确获取其稳定的水下动态响应。

为验证所建立MFC致动弹性结构流固耦合动力学模型的有效性,开展水下弹性结构在单一频率简谐信号激励下的稳定振动性能测试。测试过程中激励信号频率范围为10~13 Hz,其中10~11 Hz范围内频率间隔0.2 Hz,11~13 Hz范围内频率间隔0.1 Hz,激励电压峰值800 V,激励时间30 s,共进行了26组实验。

图13给出了水下弹性结构不同激励频率下的稳定振动频率响应曲线,可以看出水下弹性结构在12 Hz左右时的稳定振动幅度达到最大值,与理论计算结果基本一致,且水下弹性结构末端振动响应的相频特性与理论计算结果吻合良好,但图13(b)中实测相频特性的初始相位比理论值滞后 -12.21° ,这是由于建模过程中直接截取了弹性结构的一阶振动模态,造成高阶振动模态的能量在保留模态模型中重新分布,导致代表系统一阶振动特性的传递函数模型结构发生变化,且主要改变系统模型零点的分布情况,从而影响系统振动响应的相频特性。另外,从图13(a)中可以看出

水下弹性结构的频响曲线存在着明显的不平滑现象,这是由于弹性结构振动过程中所受水动力非线性以及MFC本身迟滞非线性所致。采用机-电-液耦合模型所得到的结果与实验结果吻合良好,证实了该模型能够有效地描述水下弹性结构振动特性。

图13 水下MFC致动弹性结构的理论和实验频响结果对比
Fig. 13 Comparison of theoretical and experimental frequency response results of the underwater elastic structure

5 结论

推导了MFC致动器多层复合结构的等效驱动力矩和周围水动力载荷的表达式,建立了局部粘贴MFC致动器的水下弹性结构机-电-液耦合振动模型,并开展了MFC激励下的水下弹性结构的频率响应实验。与匀质等截面的弹性结构相比,粘贴MFC致动器的主动变形段末端的变形量仅为被动变形段末端的3%,粘贴MFC部分的主动变形部分刚度明显增强。

受周围流体附加质量和流体阻尼效应的影响,水下弹性结构的共振频率和响应振幅较空气中显著下降。数值仿真和实验测试结果表明所得耦合动力学模型的预测结果与结构实际振动的频率响应特性曲线基本一致,证实了所提出机-电-液耦合模型的有效性。

参考文献:

- [1] 吴义鹏,周圣鹏,裘进浩,等.用于超低频振动能收集的压电弹簧摆结构设计与实现[J].振动工程学报,2019,32(5):750-756.
Wu Yipeng, Zhou Shengpeng, Qiu Jinhao, et al. Design and implementation of a piezoelectric spring pendulum structure applied in ultra-low frequency vibration energy harvesting [J]. Journal of Vibration Engineering, 2019, 32(5): 750-756.
- [2] 王国彪,陈殿生,陈科位,等.仿生机器人研究现状与发展趋势[J].机械工程学报,2015,51(13):27-44.
Wang Guobiao, Chen Diansheng, Chen Kewei, et al. The current research status and development strategy on biomimetic robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(13): 27-44.
- [3] 邱志成,李城.双连杆柔性机械臂振动主动控制与实验[J].振动、测试与诊断,2019,39(3):503-511.
Qiu Zhicheng, Li Cheng. Experimental study on two-link rigid-flexible manipulator vibration control [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2019, 39(3): 503-511.
- [4] 朱吟龙,谭大鹏,李霖,等.含裂纹损伤充液圆柱壳的振动响应求解方法[J].固体力学学报,2019,40(1):51-73.
Zhu Yinlong, Tan Dapeng, Li Lin, et al. A method for analyzing the vibration responses of thin liquid-filled cylindrical shells with crack damage [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(1): 51-73.
- [5] 娄军强,周优鹏,廖江江,等.压电柔性臂的ARMAX模型辨识降阶及最优极点移动控制[J].振动工程学报,2018,31(1):132-139.
Lou Junqiang, Zhou Youpeng, Liao Jiangjiang, et al. ARMAX model identification and vibration suppression of a piezoelectric flexible manipulator using optimal pole shifting control [J]. Journal of Vibration Engineering, 2018, 31(1): 132-139.
- [6] Michael G, Steven I, Michal Z, et al. Multimodal atomic force microscopy with optimized higher eigenmode sensitivity using on-chip piezoelectric actuation and sensing [J]. Nanotechnology, 2018, 30(8): 085503.
- [7] Moradi-Dastjerdi R, Meguid S, Rashahmadi S. Dynamic behavior of novel nanocomposite diaphragm in piezoelectrically-actuated micropump [J]. Smart Materials and Structures, 2019, 28(10): 105022.
- [8] 王晓宇,王浩威,闫雪梅,等.空间柔性天线展开臂的半主动振动控制研究[J].机械工程学报,2020,56(5):116-122.
Wang Xiaoyu, Wang Haowei, Yan Xuemei, et al. Semi-active vibration suppression of space flexible antenna arm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(5): 116-122.
- [9] 安方,吴江海,张万良.抑制压电圆柱壳水下振动的鲁棒时滞控制器设计[J].应用力学学报,2018,35(2):398-403.
An Fang, Wu Jianghai, Zhang Wanliang. Dynamic output feedback overlapping decentralized guaranteed cost control approach for structures with uncertain parameters [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2018, 35(2): 398-403.
- [10] Cen L, Erturk A. Bio-inspired aquatic robotics by untethered piezohydroelastic actuation [J]. Bioinspiration & Biomimetic, 2013, 8(1): 016006.
- [11] Lou J Q, Yang Y L, Chen T H, et al. Oscillating performance and propulsion mechanism of biomimetic underwater oscillatory propulsion by resonant actuation of macro fiber composites [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science, 2020, 234(8): 1660-1672.
- [12] 赵立波,徐龙起,热合曼艾比布力,等.矩形微悬臂梁的流固耦合谐振频率分析[J].西安交通大学学报,2013,47(11):60-64.
Zhao Libo, Xu Longqi, Hebibul Rahman, et al. Resonant frequency of rectangular mic-cantilever in fluid-structure interaction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(11): 60-64.
- [13] Van Eysden C, Sader J. Frequency response of cantilever beams immersed in viscous fluids with applications to the atomic force microscope: arbitrary mode order [J]. Journal of Applied Physics, 2007, 101(4): 044908.
- [14] Aureli M, Basaran M, Porfiri M. Nonlinear finite amplitude vibrations of sharp-edged beams in viscous fluids [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(7): 1624-1654.
- [15] 胡璐,闫寒,张文明,等.黏性流体环境下V型悬臂梁结构流固耦合振动特性研究[J].力学学报,2018,50(3):643-653.
Hu Lu, Yan Han, Zhang Wenming, et al. Analysis of flexural vibration of V-shaped beams immersed in viscous fluids [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2018, 50(3): 643-653.
- [16] Shahab S, Erturk A. Electrohydroelastic Euler-Bernoulli-Morison model for underwater resonant actuation of macro-fiber composite piezoelectric cantilevers [J]. Smart Materials and Structures, 2016, 25(10): 105007.
- [17] Yeh P D, Alexeev A. Biomimetic flexible plate actuators are faster and more efficient with a passive attachment [J]. Acta Mechanica Sinica, 2016, 32(6): 1001-1011.
- [18] 任泉荣,娄军强,贾振,等.压电纤维致动的仿鲤鱼尾鳍式小型推进器的摆动特性及流固耦合机理[J].机械工程学报,2019,55(20):214-221.
Ren Xiaorong, Lou Junqiang, Jia Zhen, et al. Oscillat-

- ing performance and fluid-structure interaction mechanism of a small Koi's caudal fin-like underwater propulsion actuated by MFC [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(20): 214-221.
- [19] Deraemaeker A, Nasser H. Numerical evaluation of the equivalent properties of Macro Fiber Composite (MFC) transducers using periodic homogenization [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2010, 47(24): 3272-3285.
- [20] Shahab S, Erturk A. Coupling of experimentally validated electroelastic dynamics and mixing rules formulation for macro-fiber composite piezoelectric structures [J]. *Journal of Intelligent Materials Systems and Structures*, 2017, 28(12): 1575-1588.

Electricity-structure-fluid coupled vibration of underwater elastic cantilever with partially bonded Macro Fiber Composite (MFC) actuators

GU Ting¹, LOU Jun-qiang^{1,2}, YANG Yi-ling¹, CHEN Te-huan¹, CHEN Hai-rong¹, WEI Yan-ding²

(1.School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Zhejiang Province, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: An electricity-structure-fluid coupled model of an elastic cantilever with partially bonded MFC actuators is proposed, and the frequency response experiments of the underwater structure with different excitation levels of the MFC are carried out. The equivalent structural and dielectric parameters of the representative volume element of the MFC actuator are obtained by using the mixing rules method. Based on the assumed mode method, the segmented first-order normalized mode shapes of the cantilever with partially bonded MFC are determined. It shows that the displacement at the end of the active deformation section with bonded MFC actuators is only 3% of that at the tip of the passive deformation section, and the mode shapes of the proposed cantilever change significantly compared with the cantilever with a uniform cross-section. Then, the electricity-structure-fluid coupled dynamic equation of the proposed structure is established. The internal actuation moment of the actuators, the hydrodynamic load provided by the surrounding fluids and the vibration behavior of the elastic structure are all considered in the coupled model. Based on the established set-up, the frequency responses of the underwater elastic structure at different excitation frequencies of the MFC actuators are conducted. Experimental results show that the magnitude-frequency and phase-frequency spectrums of the underwater elastic structure in experiments match well with those of the established model. The effectiveness and feasibility of the obtained coupled model are demonstrated.

Key words: underwater elastic structure; electricity-structure-fluid coupled; hydrodynamic load; Macro Fiber Composites (MFC); partially bonded

作者简介: 顾 霆(1996—),男,硕士研究生。电话:18892628087;E-mail:994177747@qq.com。

通讯作者: 娄军强(1986—),男,博士后,副教授。E-mail: loujunqiang@nbu.edu.cn。

魏燕定(1970—),男,教授,博士生导师。E-mail: weiyd@zju.edu.cn。