

# 基于模态局部化的谐振式双通道质量检测方法

李东发 杨威 汤沛源 李磊

(山东理工大学交通与车辆工程学院 淄博 255049)

**摘要:**交叉灵敏度会导致多通道质量传感器的检测性能下降,限制了其在实际生产中的应用。为消除交叉灵敏度影响,基于模态局部化原理设计了一种山字形对称分布的谐振梁结构,利用不同模态振型提出了一种双通道质量的独立谐振检测方法。首先,对谐振梁结构进行设计并建立了动力学方程,随后利用 COMSOL 有限元软件仿真确定结构的具体尺寸以及模态振型;其次,通过实验证在不同谐振梁上增加吸附质量对前三阶频率以及振幅的影响;然后,采用前三阶模态的振幅比作为输出信号实现了单质量谐振检测,并利用第2阶和第3阶模态振动进一步提出了双质量谐振检测方法。实验结果表明,在前三阶频率下分别可实现0~16、0~4、0~3 mg的质量检测范围,并且检测灵敏度随着模态阶数的升高而增大。利用2、3阶频率组合检测能够消除交叉灵敏度对双通道质量检测的不利影响,提高检测方法的可靠性,为后续质量传感器的设计与优化提供了坚实的理论基础。

**关键词:**多质量检测;模态局部化;压电驱动;交叉灵敏度;模态振型

中图分类号: TP212; TN384 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

## Resonant dual-channel mass detection method based on mode localization

Li Dongfa Yang Wei Tang Peiyuan Li Lei

(College of Transportation and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

**Abstract:** Cross-sensitivity inevitably degrades the detection performance of multi-channel mass sensors and thus restricts their practical deployment in industrial environments. To suppress this parasitic effect, we herein propose a symmetric “mountain-shaped” resonant beam architecture founded on the principle of mode localization. Firstly, the resonant beam structure is theoretically analyzed and the dynamic equation is established. Then, the specific dimensions and the first three mode shapes are determined by COMSOL finite element software simulation. Secondly, the influence of adding adsorption mass on different resonant beams on the first three frequencies and amplitudes is verified by experiments. Then, the amplitude ratio is used as the output signal to achieve single-mass detection of the first three modes. On this basis, a dual-mass detection scheme is further designed and experimentally verified. The results show that the mass detection range of 0~16, 0~4, and 0~3 mg can be achieved at the first three frequencies, respectively. By exploiting the disparate modal shapes of the second and third eigenmodes, a decoupled resonant sensing paradigm for dual-channel mass determination is established. The synergistic exploitation of the second- and third-order eigenfrequency pairs effectively nullifies the deleterious influence of cross-sensitivity on dual-channel measurements, thereby enhancing the robustness and reliability of the proposed methodology. These findings furnish a rigorous theoretical basis for the subsequent design and optimization of high-performance mass sensors.

**Keywords:** multi-mass inspection; mode localization; piezoelectric actuation; cross-sensitivity; mode shape

## 0 引言

微悬臂梁谐振式传感器具有体积小、结构简单、易加工和灵敏度高等优点。通过将被测量转换为谐振频率或振幅的变化可实现对微质量、加速度、压力等参数的检测,因此在工业、军事、车辆、环境安全<sup>[1-3]</sup>领域有着广泛的应用。

Liu 等<sup>[4]</sup>提出了一种梯度非对称三梁阵列结构,在不缩小尺寸的情况下即实现了质量传感又提高了传感灵敏度。Gao 等<sup>[5]</sup>提出了一种新型的四阶模式质量传感器,通过优化台阶悬臂梁的形状,成功地提高了传统均匀悬臂梁传感器的高阶模式灵敏度。Xia 等<sup>[6]</sup>提出一种基于 1:3 内共振的 G 形耦合梁结构,能够初步实现提出的多重预警方案,实现吸附质量两次预警。刘汉彪等<sup>[7]</sup>提出了一种利用模态局部化现象检测外部吸附质量的可调式压电驱动谐振质量传感器,通过添加调谐质量扩大了传感器的测量范围,同时分辨率也得到优化。Xiong 等<sup>[8]</sup>研究了微悬臂梁系统中的模态局域化和模态转向现象,以及它们对质量传感的影响,提出了一种新的灵敏度度量方法。Meesala 等<sup>[9]</sup>研究了两种不同的 U 形悬臂梁传感器设计,利用参数激励下的分叉来增强质量传感。Li 等<sup>[10-11]</sup>设计了 T 型和 π 型谐振传感器结构,通过模态耦合振动实现质量预警,能够利用由吸附质量引起的幅度跳跃来实现两次质量预警和 3 次质量预警。Rabenimana 等<sup>[12]</sup>设计了一种两自由度微悬臂梁微机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)质量传感,利用模态局部现象检测吸附质量,相比单自由度频移传感器具有更高的灵敏度。Hong 等<sup>[13]</sup>利用具有模态局域化的四悬臂梁阵列结构,研究了吸附质量对振幅以及频率的影响,最后得到了以振幅比作为输出的灵敏度最高的结论。然而传统的单自由度微谐振式传感器单一检测已经无法满足日益复杂的场景使用要求,因此研究多通道微谐振式传感器是谐振式传感器的重要方向<sup>[14-18]</sup>。然而,多通道谐振检测时,不同待测质量之间会相互影响,导致明显的交叉干扰,降低质量检测的精度。

本文以模态局部化现象为研究的出发点,深入探讨了三自由度阵列谐振梁结构在吸附质量下前三阶振型的变化特性,通过设计的实验和理论分析,提出了一种双质量检测方法,成功克服了交叉灵敏度对质量检测性能的影响。

## 1 结构设计及理论分析

阵列谐振梁模型如图 1(a)所示,该结构由谐振梁、

固定端和陶瓷压电片构成。谐振梁 1、谐振梁 2、谐振梁 3 对称分布在谐振梁 4 上。同时谐振梁 1、谐振梁 2、谐振梁 3 的自由端上设置有吸附层,可特异性吸附目标物质。谐振梁 4 两端由固定夹具进行固定,陶瓷压电片粘贴在谐振梁 4 一端,当有激励作用时,压电片将电能转化为机械能,从而驱动谐振梁 4 振动,并带动整个结构产生振动。图 1(b)所示为谐振结构的质量-弹簧-阻尼示意图。

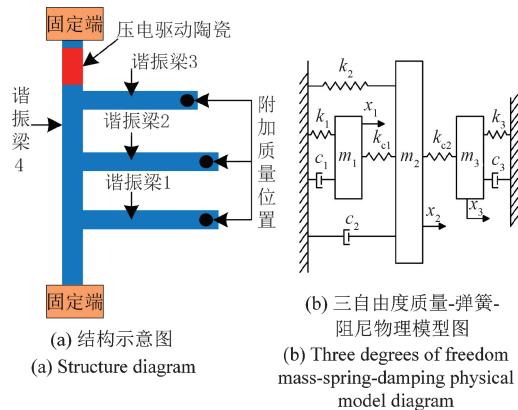


图 1 阵列梁模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of array beam model

当待测质量加载到不同谐振梁的测量区域时,谐振梁的振动特性会发生显著变化。由于模态局部化效应,这个变化会被放大。具体表现为不同谐振梁的振幅比对待测质量出现明显依赖的现象。

利用图 1(b)的三自由度质量-弹簧-阻尼模型图,建立系统的无阻尼运动方程<sup>[19-20]</sup>:

$$\begin{bmatrix} m_1(1 + \delta_1) & 0 & 0 \\ 0 & m_2(1 + \delta_2) & 0 \\ 0 & 0 & m_3(1 + \delta_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \\ \ddot{x}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_{e1} & -k_{e1} & 0 \\ -k_{e1} & k_1 + k_{e1} + k_{e2} & -k_{e2} \\ 0 & -k_{e2} & k_3 + k_{e2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

式中:  $m_1, m_2, m_3$  为谐振梁 1、谐振梁 2 和谐振梁 3 的等效质量,其中  $m_1 = m_2 > m_3$ ;  $\delta$  为添加质量与谐振梁等效质量之比即  $\Delta m/m$ ;  $k_{e1}$  和  $k_{e2}$  为谐振梁 1 与谐振梁 2 和谐振梁 2 与谐振梁 3 之间的耦合刚度,设定  $k_{e1} = k_{e2}$ , 谐振梁的等效刚度分别是  $k_1, k_2, k_3$ ;  $[x]$  与  $[\ddot{x}]$  分别表示谐振梁的位移列向量和加速度列向量;  $[M]$  和  $[K]$  分别为质量矩阵和刚度矩阵。式(1)的解形式可表达为:

$$(x_1 \ x_2 \ x_3)^T = \mathbf{u}_{0n} e^{i\omega t} \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{u}_{0n}$  为系统第  $n$  阶模态的特征向量。将式(2)代入式(1)得到:

$$\begin{bmatrix} k + k_{c1} & -k_{c1} & 0 \\ -k_{c1} & k + k_{c1} + k_{c2} & -k_{c2} \\ 0 & -k_{c2} & k + k_{c2} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{0n} = \lambda_{0n} \begin{bmatrix} 1 + \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \delta_3 \end{bmatrix} \mathbf{u}_{0n} \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  为系统第  $n$  阶模态的无量纲特征频率。其中  $\lambda_{0n} = \omega^2 \cdot m/k$ , 将式(3)进行无量纲化, 表达式如下:

$$\mathbf{K}_0 \mathbf{u}_{0n} = \lambda_{0n} \mathbf{M}_0 \mathbf{u}_{0n} \quad n = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中:

$$\mathbf{M}_0 = \begin{bmatrix} 1 + \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \delta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \delta_3 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_0 = \begin{bmatrix} k_1 + k_{c1} & -k_{c1} & 0 \\ -k_{c1} & k_2 + k_{c1} + k_{c2} & k_{c2} \\ 0 & k_{c2} & k_3 + k_{c2} \end{bmatrix}$$

$$k_1 = k_2 = k_3 = k, \kappa_n = k_{cn}/k \quad n = 1, 2$$

即:

$$\begin{bmatrix} (1 + \kappa_1) & -\kappa_1 & 0 \\ (1 + \delta_1) & (1 + \delta_1) & 0 \\ -\kappa_1 & (1 + \kappa_1 + \kappa_2) & -\kappa_2 \\ (1 + \delta_2) & (1 + \delta_2) & (1 + \delta_2) \\ 0 & -\frac{\kappa_2}{(1 + \delta_3)} & \frac{1 + \kappa_2}{(1 + \delta_3)} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{0n} = \lambda \mathbf{u}_{0n} \quad (5)$$

由式(5)可知, 当不添加质量, 即吸附质量比  $\delta = 0$  时, 可得到阵列谐振梁结构的前三阶特征值以及特征向量为:

$$\lambda_{01} = 1$$

$$\lambda_{02} = \kappa_{c1} + \kappa_{c2} - (\kappa_{c1}^2 - \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} + \kappa_{c2}^2)^{\frac{1}{2}} + 1$$

$$\lambda_{03} = \kappa_{c1} + \kappa_{c2} + (\kappa_{c1}^2 - \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} + \kappa_{c2}^2)^{\frac{1}{2}} + 1 \quad (6)$$

$$\mathbf{u}_{01} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{u}_{02} =$$

$$\begin{bmatrix} \left[ \frac{(\kappa_{c1} + \kappa_{c2} - (\kappa_{c1}^2 - \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} + \kappa_{c2}^2)^{\frac{1}{2}} + 1)}{\kappa_{c2}} - \frac{(2 \cdot \kappa_{c2} + 1)}{\kappa_{c2}} \right] \\ \left[ \frac{(\kappa_{c2} + 1)}{\kappa_{c2}} - \frac{(\kappa_{c1} + \kappa_{c2} - (\kappa_{c1}^2 - \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} + \kappa_{c2}^2)^{\frac{1}{2}} + 1)}{\kappa_{c2}} \right] \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{u}_{03} = \begin{bmatrix} \frac{(\kappa_{c1} + \kappa_{c2} + (\kappa_{c1}^2 - \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} + \kappa_{c2}^2)^{\frac{1}{2}} + 1)}{\kappa_{c2}} - \frac{(2 \cdot \kappa_{c2} + 1)}{\kappa_{c2}} \\ \frac{(\kappa_{c2} + 1)}{\kappa_{c2}} - \frac{(\kappa_{c1} + \kappa_{c2} + (\kappa_{c1}^2 - \kappa_{c1} \cdot \kappa_{c2} + \kappa_{c2}^2)^{\frac{1}{2}} + 1)}{\kappa_{c2}} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

在未考虑吸附质量的条件下, 利用 COMSOL 软件对谐振梁结构进行了仿真分析。仿真参数如表 1 所示, 谐振梁结构的前六阶模态仿真阵型图如图 2 所示。

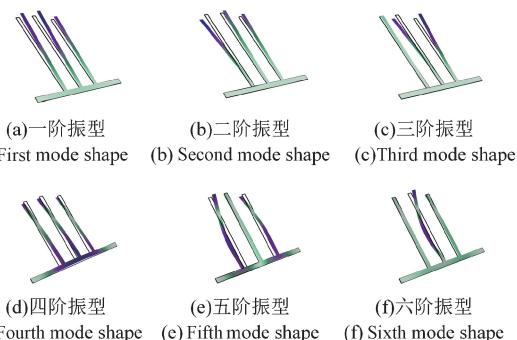


图 2 谐振梁结构前六阶振型图

Fig. 2 The first six modes of resonant beam structure

由图 2 可知, 谐振结构在第 1 阶模态的振型为谐振梁 1、2 和 3 同相振动, 第 2 阶模态中谐振梁 1 与谐振梁 2、3 反相振动。第 3 阶振型中谐振梁 1 不振动, 谐振梁 2 和谐振梁 3 反相。第 4 阶振型中谐振梁 4 发生振动, 其他 3 根谐振梁都发生了轻微的弯扭。第 5 和第 6 阶振型中谐振梁结构发生了严重的弯扭, 不适合作为传感振型。仿真结构的前三阶固有频率分别为 23.5、35.3 和 39.6 Hz。综上所述, 为实现谐振结构的质量检测功能, 选取前三阶模态作为研究目标。

谐振梁的材料选用铍青铜, 同时选用 PZT-5H 压电陶瓷片进行驱动力输出, 表 1 为模型的各种参数, 其中  $L_1$  表示谐振梁 1 的长度,  $L_2$  表示谐振梁 2 的长度,  $L_3$  表示谐振梁 3 的长度,  $L_4$  表示谐振梁 4 的长度,  $h_b$  表示谐振梁的宽度,  $w_b$  表示谐振梁的厚度。 $L_p$  表示压电片的长度,  $h_p$  表示压电片的宽度,  $w_p$  表示压电片的厚度。

表 1 模型参数

Table 1 Model parameter

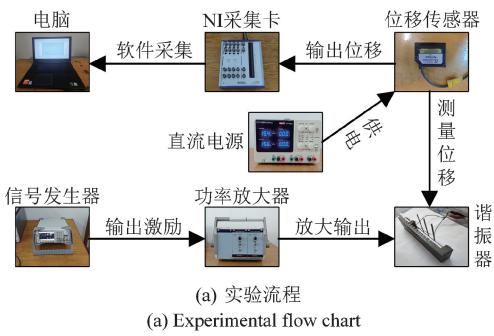
(mm)

$L_1$	$L_2$	$L_3$	$L_4$	$h_b$	$w_b$	$L_p$	$h_p$	$w_p$
66	66	61	110	4	0.3	16	4	0.4

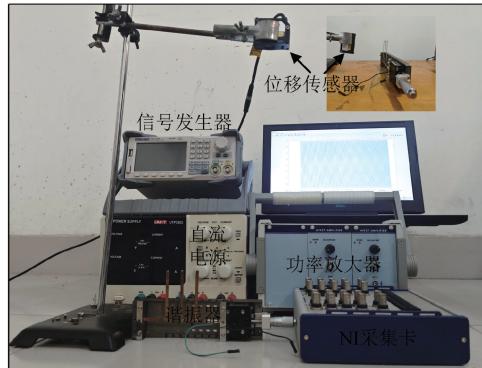
## 2 实验分析

### 2.1 实验设计

为探究双质量传感的方案可行性,搭建如图 3 所示的振动实验平台,包括信号发生器(RIGOL DG812)、功率放大器、激光位移传感器、NI 采集卡(NI-USB-6341)、计算机。实验过程中,信号发生器输出激励信号传至功率放大器,激励信号经功率放大器放大后传递给压电片,使其产生振动从而带动整个谐振梁结构发生振动,同时通过激光位移传感器测量出位移信号传输至计算机。实验流程如图 3(a)所示。



(a) 实验流程  
(a) Experimental flow chart



(b) 实验设备  
(b) Experimental setup diagram

图 3 实验平台图

Fig. 3 Experimental platform diagram

谐振梁 1、2 和 3 上的吸附层分别用一对 N35 钕铁硼磁铁作为代替,用于吸附质量为 0.5 mg 的钕磁铁质量块,因此实验时采用钕磁铁质量块作为吸附质量,如图 4 所示。

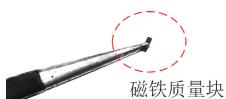


图 4 吸附质量示意图

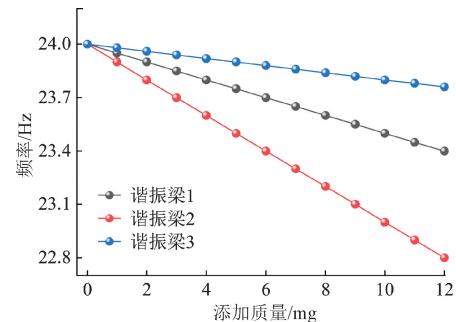
Fig. 4 Adsorption mass diagram

在实验过程中,通过镊子夹起质量块缓慢向磁铁靠近,质量块通过磁力作用吸附在谐振结构上。

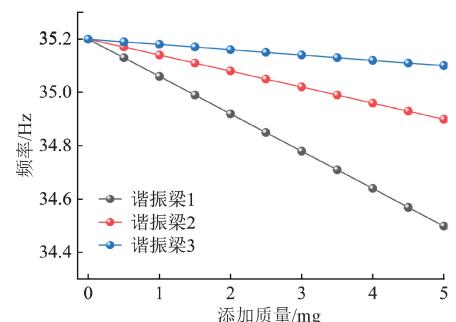
在实验中,当施加 120 V 的驱动电压时,通过扫频测得的谐振结构前三阶固有频率分别为 24.0、35.2 和 39.0 Hz。这些频率与之前仿真分析的结果存在细微差异,这可能是由于结构在实际制造过程中的焊接误差和压电片粘贴误差所导致。

### 2.2 吸附质量对动态响应的影响

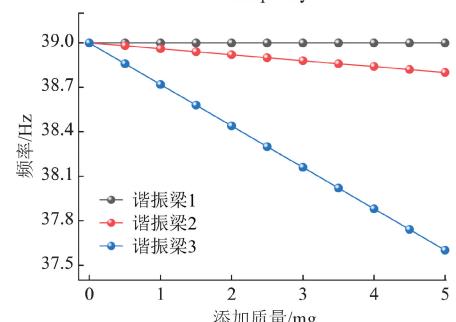
为了进一步探究吸附质量对谐振结构频率及振幅的影响。在实验中,对三根竖直梁分别施加吸附质量,并检测前三阶固有频率及振幅变化,如图 5、6 所示。



(a) 不同谐振梁施加质量对一阶频率的影响  
(a) Diagram of the influence of the applied mass of different resonant beams on the first order frequency



(b) 不同谐振梁施加质量对二阶频率的影响  
(b) Diagram of the influence of the applied mass of different resonant beams on the second order frequency

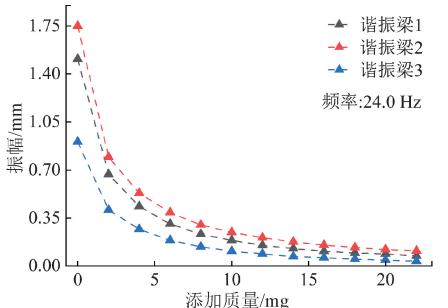


(c) 不同谐振梁施加质量对三阶频率的影响  
(c) Diagram of the influence of the applied mass of different resonant beams on the third order frequency

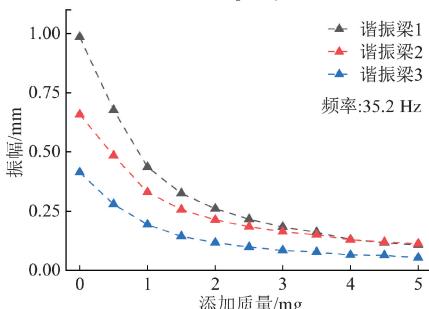
图 5 不同谐振梁施加质量对前三阶频率的影响

Fig. 5 The influence of the applied mass of different resonant beams on the first three frequencies

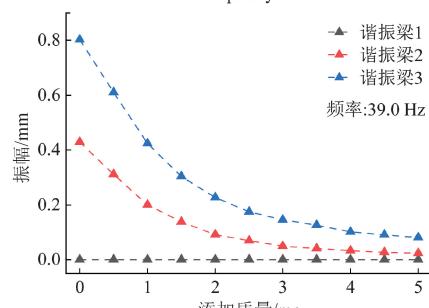
由5(a)可知,在谐振梁2上施加吸附质量时,一阶频率的变化最为显著。这表明谐振梁2对于一阶模态的频率变化非常敏感。由图5(b)可知,吸附质量对二阶频率的影响。结果表明,谐振梁1上的吸附质量对二阶频率的影响最大,而谐振梁3的吸附质量对二阶频率的影响相对较小。由图5(c)可知,吸附质量对三阶频率的影响。在这种情况下,谐振梁3上的吸附质量对三阶频率的影响最为显著,而谐振梁1的吸附质量对三阶频率没有任何影响。



(a) 一阶共振频率下不同谐振梁施加质量对幅值的影响  
(a) The influence of the applied mass of different resonant beams on the amplitude at the first order resonance frequency



(b) 二阶共振频率下不同谐振梁施加质量对幅值的影响  
(b) The influence of the applied mass of different resonant beams on the amplitude at the second order resonance frequency



(c) 三阶共振频率下不同谐振梁施加质量对幅值的影响  
(c) The influence of the applied mass of different resonant beams on the amplitude at the third order resonance frequency

图6 不同谐振梁施加质量对前三阶振幅的影响

Fig. 6 The influence of the applied mass of different resonant beams on the amplitude of the first three orders

量后的振幅变化情况。观察图6可以发现,无论在哪一谐振梁上施加吸附质量,随着附加质量的增加,振幅均呈现减小趋势。这一现象可归因于附加质量的增加导致系统共振频率偏离驱动频率,进而引发振幅衰减。

由图6(a)可知,在一阶频率24.0 Hz驱动下,谐振梁2的振幅 $A_2$ 最为显著,而谐振梁3的振幅 $A_3$ 相对较小。由图6(b)可知在二阶频率35.2 Hz的驱动下,谐振梁1的振幅 $A_1$ 达到最大,而谐振梁3的振幅 $A_3$ 依然最小。图6(c)进一步表明,在39.0 Hz的三阶频率驱动下,谐振梁3的振幅 $A_3$ 显著增大,而谐振梁1则不发生振动。

### 3 谐振质量检测方法

#### 3.1 单通道质量检测

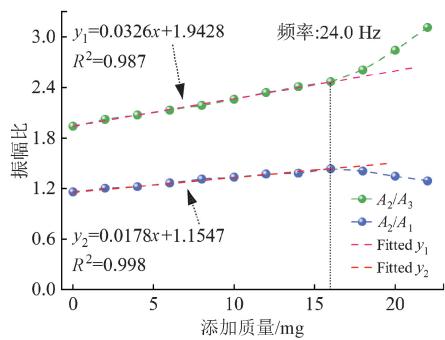
通过上述研究,吸附质量对谐振结构的前三阶动态响应具有明显的影响。基于此,首先利用模态局部化提出了不同振动模态下的单通道质量检测方案。在一阶频率下选取谐振梁2添加吸附质量,以振幅比作为输出参数,可以明显的检测到振幅的变化,类似地,在二阶频率下选取谐振梁1添加质量,在三阶频率下选取谐振梁3添加质量,获得添加质量-振幅比示意图如图7所示。

由图7(a)可知,在一阶频率驱动下,以谐振梁2为检测元件,采用振幅比 $A_2/A_1$ 和 $A_2/A_3$ 作为输出参数。实验观察到,初始振幅比分别为1.16和1.94。随着附加质量的增加,这两个振幅比均呈现持续增大的趋势,并在0~16 mg的质量范围内显示出线性变化的特性。通过对实验数据进行曲线拟合,确定了线性回归的决定系数 $R^2$ ,其中 $R^2$ 值接近1表示拟合效果理想。分析表明, $A_2/A_3$ 的拟合曲线 $y_1$ 的斜率大于 $A_2/A_1$ 的拟合曲线 $y_2$ 的斜率,表明 $A_2/A_3$ 的振幅比变化更为显著。同时, $A_2/A_3$ 拟合曲线的决定系数 $R^2$ 为0.987,略低于 $A_2/A_1$ 拟合曲线的决定系数,因此,采用 $A_2/A_3$ 作为输出参数将提供更高的检测灵敏度,而 $A_2/A_1$ 则使检测更为精确。

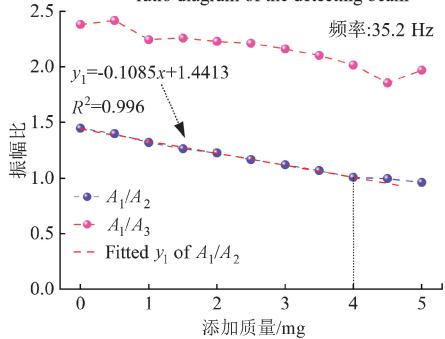
在二阶频率驱动下(图7(b)),以谐振梁1为检测元件。观察到,当以 $A_1/A_2$ 作为输出参数时,曲线并未显示出线性关系,因此不适用于质量检测。然而,当以 $A_1/A_3$ 作为输出参数时,初始振幅比为1.45。在0~4 mg的质量范围内显示出良好的线性度,并且拟合曲线的斜率大于一阶频率下的拟合曲线斜率,表明对于吸附质量更为灵敏。

在三阶频率驱动下(图7(c)),以谐振梁3为质量检测元件。由于在三阶频率驱动下,谐振梁1不发生振动,因此只能选择振幅比 $A_3/A_2$ 作为输出参数。实验结果显示,初始振幅比为1.86。在0~3 mg的质量范围内,该振幅比显示出线性度,并且与前两阶频率驱动相比,三阶频率驱动下的质量检测灵敏度最高,尽管其检测范围相对

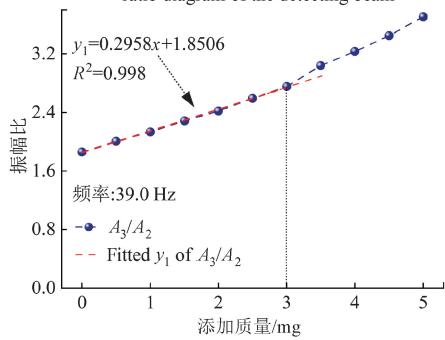
图6 为在前三阶频率下,对3根谐振梁施加吸附质



(a) 谐振梁2作为检测梁的振幅比  
(a) The resonant beam 2 is used as the amplitude ratio diagram of the detecting beam



(b) 谐振梁1作为检测梁的振幅比  
(b) The resonant beam 1 is used as the amplitude ratio diagram of the detecting beam



(c) 谐振梁3作为检测梁的振幅比  
(c) The resonant beam 3 is used as the amplitude ratio diagram of the detecting beam

图 7 前三阶频率下选用不同谐振梁作为检测梁的振幅比图

Fig. 7 In the first three frequencies, different resonant beams are selected as the detection beams to obtain the amplitude ratio diagram

较小。图 7 中所有振幅比的拟合曲线的决定系数均大于 0.98, 确保了施加质量与振幅比之间关系函数的可靠性。

表 2 为前三阶质量检测灵敏度具体数据, 计算方法如式(10)所示。

$$S = \frac{\Delta A}{\Delta m} \quad (10)$$

式中:  $\Delta A$  表示初始振幅比与施加  $\Delta m$  质量扰动之后的振幅比之差;  $\Delta m$  表示谐振梁上施加的质量。

表 2 前三阶频率下的灵敏度

Table 2 Sensitivity at the first three frequencies (g<sup>-1</sup>)

一阶	二阶	三阶
$A_2/A_1$	$A_2/A_3$	$A_1/A_2$
17.8	32.6	108.5
		295.8

由表 2 可知, 一阶频率驱动下, 以振幅比  $A_2/A_3$  作为输出的检测灵敏度大。并且随着模态阶数的增加, 谐振结构的检测灵敏度越来越高, 这是因为高阶模态对外界扰动非常敏感。

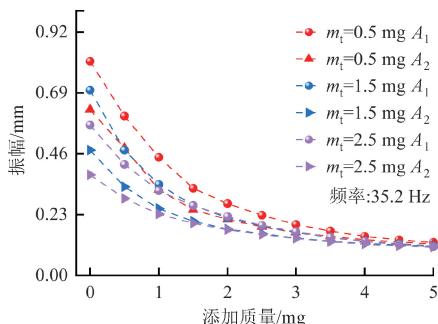
### 3.2 双通道质量检测

本研究旨在探索双质量检测方案, 并将其与先前单一质量检测实验相结合进行深入分析。在一阶频率激励下, 发现以谐振梁 2 作为检测梁时, 其检测范围最为广泛。然而, 向谐振梁 2 施加吸附质量会显著影响前 3 个谐振频率。通过对图 5 的观察, 注意到谐振梁 1 对三阶频率无显著影响, 而谐振梁 3 对二阶频率的影响也几乎可以忽略不计。基于这些发现, 选择在二阶频率下利用谐振梁 1 进行质量检测, 同时在谐振梁 3 上增加吸附质量, 在三阶频率下利用谐振梁 3 进行检测, 并在谐振梁 1 上增加吸附质量, 作为双通道质量检测方案。这种选择旨在最大限度地减少各检测梁之间的相互干扰, 获得了吸附质量-振幅曲线如图 8 所示。

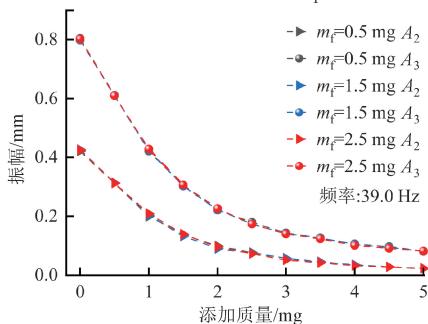
图 8(a) 为二阶频率 35.2 Hz 驱动下, 谐振梁 1 上施加吸附质量, 同时在谐振梁 3 上添加固定质量  $m_1$ , 取  $m_1$  为 0.5、1.5、2.5 mg, 并且检测谐振梁 1 和谐振梁 2 的振幅。结合图 6(b) 可知, 谐振梁的振幅  $A_1$  和  $A_2$  都随着添加质量的增大而减小。同时, 随着  $m_1$  的增大, 初始振幅减小, 这是因为在谐振梁 3 上施加质量, 使二阶频率远离驱动频率所致。由图 8(b) 可见, 在三阶频率 39.0 Hz 驱动下, 在谐振梁 1 上添加固定质量  $m_1$ , 取  $m_1$  为 0.5、1.5、2.5 mg, 向谐振梁 3 施加吸附质量, 并且检测谐振梁 2 和谐振梁 3 的振幅。结合图 6(c) 可知, 谐振梁的振幅  $A_3$  和  $A_2$  也都随着添加质量的增大而减小, 同时,  $m_1$  的大小对其幅值变化不产生任何影响。

在实际应用场景中, 多通道传感器中一个通道的测量易受到其他检测通道的影响, 即交叉灵敏度, 需要通过数学建模等方法区分真实输出和干扰信号。本文利用模态局部化提出的双通道检测方法能够有效避免交叉灵敏度的出现, 为验证双通道质量检测的可靠性, 获得吸附质量-振幅比曲线, 如图 9 所示。

图 9 为多质量检测方案的实验数据, 如图 9(a) 可见, 在二阶频率下选用谐振梁 1 施加质量, 以振幅比  $A_1/A_2$  作为输出, 结合图 7(b) 可知, 在谐振梁 3 上施加固定质量  $m_1$  时, 振幅比  $A_1/A_2$  曲线受其影响产生波动, 但仍呈减小的趋势, 并且在 0~4 mg 范围内具有线性度, 超过 4 mg 后趋于平缓, 同时拟合曲线并未产生变化。图 9(b)



(a) 二阶频率下3梁固定质量, 1梁施加质量振幅变化  
(a) At the second-order frequency, the mass of resonant beam 3 is fixed, and the mass disturbance of resonant beam 1 affects the overall amplitude



(b) 三阶频率下1梁固定质量, 3梁施加质量振幅变化  
(b) At the third order frequency, the mass of resonant beam 1 is fixed, and the mass disturbance of resonant beam 3 affects the overall amplitude

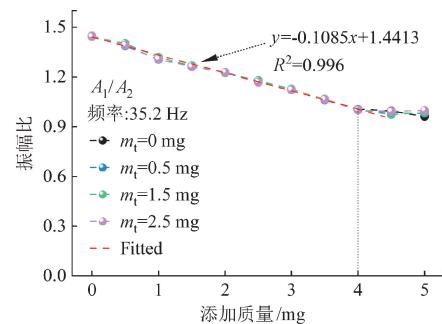
图 8 有固定质量下施加吸附质量对振幅的影响

Fig. 8 The effect of mass perturbation on amplitude when there is a fixed mass

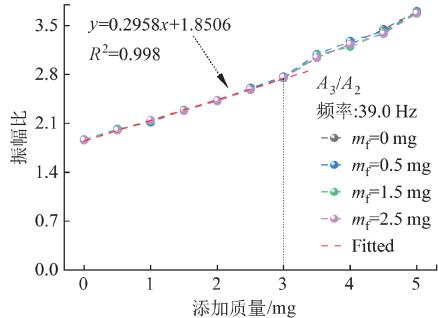
为三阶频率下的检测曲线,结合图 7(c)可知,在  $m_f$  变化时,振幅比  $A_3/A_2$  的曲线并未产生波动,仍与谐振梁 1 未加固定质量时的振幅比曲线重合,在 0~3 mg 内具有线性关系,超过 3 mg 后线性消失。综上所述,在二阶频率下以谐振梁 1 检测物质 A,三阶频率下以谐振梁 3 检测物质 B,以振幅比  $A_1/A_2$  和  $A_3/A_2$  作为输出,可实现两种物质的质量检测。据以往研究表明,单一通道的吸附质量变化会影响其他通道的检测结果。而根据图 9 可知,本文所提出的谐振结构和检测方法能够有效避免交叉灵敏度的出现,实现双通道质量独立检测。

## 4 结 论

本文根据阵列谐振梁结构,提出了一种基于模态局部化的谐振式双通道质量检测方法,首先建立谐振式多质量传感器动力学理论模型,并对其进行求解,再利用 COMSOL 仿真进一步确定阵列谐振结构的尺寸。然后通过实验探究了在不同谐振梁上施加吸附质量对频率以及振幅的影响,在前三阶频率下,分别对单物质的检测进行了研究,以振幅比作为主要的输出参数。然后在此基础上设计双质量检测方案,并且通过实验验证。实验结果



(a) 二阶频率下3梁固定质量, 1梁施加质量的振幅比  
(a) Amplitude ratio graph for the second mode with resonant beam 1 undergoing mass perturbation and resonant beam 3 having fixed mass



(b) 三阶频率下1梁固定质量, 3梁施加质量的振幅比  
(b) Amplitude ratio graph for the third mode with resonant beam 3 undergoing mass perturbation and resonant beam 1 having fixed mass

图 9 有固定质量下增加吸附质量对振幅比的影响

Fig. 9 The influence of increasing adsorption mass under a fixed mass on the amplitude ratio

表明,二阶频率下以谐振梁 1 为作为检测梁,三阶频率下以谐振梁 3 为检测梁,采用不同的振幅比作为输出参数,可实现双物质的独立检测,并避免交叉灵敏度影响,证明了双通道质量检测方案的可行性。但在检测灵敏度方面并未进行深入研究,后续将考虑提高灵敏度的工作,同时对如何增加检测通道的问题进一步研究。

## 参考文献

- [1] 秦孝良,高健,王永敏,等. 传感器技术在环境空气检测与污染治理中的应用现状、问题与展望[J]. 中国环境检测, 2019, 35(4): 162-172.  
QIN X L, GAO J, WANG Y M, et al. Current status, challenges, and future prospects of sensor technology in the field of ambient air monitoring and pollution control [J]. Environmental Monitoring in China, 2019, 35 (4): 162-172.
- [2] NIRANJAN A, GUPTA P, RAIJORIVA M. Piezoelectric MEMS micro-cantilever biosensor for detection of SARS-CoV2 [C]. 2021 International Conference on Communication, Control and Information Sciences (ICCIISc). IEEE, 2021, 1: 1-5.
- [3] 许高斌,胡海霖,徐枝蕃,等. 谐振式 MEMS 压力传感器的设计与分析[J]. 仪表技术与传感器, 2019(12): 5-11.

- XU G B, HU H L, XU ZH F, et al. Design and analysis of resonant MEMS pressure sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019 (12): 5-11.
- [4] LIU S Y, WANG D F, YANG J, et al. A Gradient-asymmetrically localized three-beam array for mass sensing with warning [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(20): 19259-19266.
- [5] GAO R J, HUANG Y, WEN X, et al. Method to further improve sensitivity for high-order vibration mode mass sensors with stepped cantilevers [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(14): 4405-4411.
- [6] XIA C, WANG D F, ONO T, et al. A mass multi-warning scheme based on one-to-three internal resonance [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 142: 106784.
- [7] 刘汉彪,王发光,刘晨,等. 基于模态局部化的可调式压电驱动谐振质量传感器的设计[J]. *压电与声光*, 2022, 44(6): 877-884.
- LIU H B, WANG F G, LIU CH, et al. Design of adjustable piezoelectric driven resonant mass sensor based on mode localization [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2022, 44(6): 877-884.
- [8] XIONG L, TANG L. On the Sensitivity analysis of mode-localized sensors based on weakly coupled resonators [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2023, 11: 793-807.
- [9] MEESALA V C, HAJJ M R, ABDEL-RAHMAN E. Bifurcation-based MEMS mass sensors [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 180: 105705.
- [10] LI L, LIU H B, ZHANG W M. Design and experiment of mass warning resonant sensor induced by modal coupling [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(12): 11562-11574.
- [11] LI L, LIU H B, LI D F, et al. Theoretical analysis and experiment of multi-modal coupled vibration of piezo-driven Π-shaped resonator [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 192: 110223.
- [12] RABENIMANANA T, WALTER V, KACEM N, et al. Mass sensor using mode localization in two weakly coupled MEMS cantilevers with different lengths: Design and experimental model validation [J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2019, 295(15): 643-652.
- [13] HONG J, LI X D, ZHOU D, et al. Localization in coupled systems: Part III-vibration characteristics analysis in a mode-localized four cantilever array with and without mass perturbation [C]. *2018 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP)*. IEEE, 2018.
- [14] 周旭. 谐振式微悬臂梁及板结构实现多颗粒质量位置识别的方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2023.
- ZHOU X, Research on the identification method of mass position of multiple particles by resonant microstructures[D]. Shenyang: Northeastern University, 2023.
- [15] XIA C, WANG D F, SONG J, et al. Synchronous identification and successive detection of multiple traces with tunable coupling oscillators [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 166: 108395.
- [16] MEESALA V, HAJJ M R, ABDEL-RAHMAN E. Bifurcation-based MEMS mass sensors [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2022, 180(15): 105705.
- [17] ZHAO J, SUN R J, KACEM N, et al. Multi-channel mass sensing based on multiple internal resonances in three electrostatically coupled resonators [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111: 18861-18884.
- [18] ENAMI W, YABUNO H, YAMAMOTO Y, et al. Mode shift detection of coupled resonators through parametric resonance and its application to mass sensing [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2022, 110: 117-129.
- [19] WANG D F, ZHOU D, LIU S Y, et al. Localized trio cantilevers for identifying different mass perturbations [J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25: 2993-3003.
- [20] 刘书溢, 基于耦合谐振梁局部化特性的高灵敏质量感应机制研究[D]. 长春:吉林大学, 2023.
- LIU SH Y, Research on high-sensitive mass sensing mechanism based on localization characteristics of coupled resonators[D]. Changchun: Jilin University, 2023.

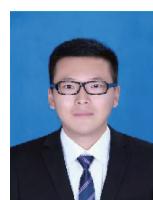
### 作者简介



李东发, 2022 年于洛阳理工学院获得学士学位, 2025 年于山东理工大学获得硕士学位, 主要研究方向为 MEMS 传感器设计。

E-mail: lidongfa@163.com

**Li Dongfa** received his B. Sc. degree from Luoyang Institute of Science and Technology in 2022 and M. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2025. His main research interest includes the design of MEMS sensors.



李磊(通信作者), 2013 年于中国农业大学获得学士学位, 2017 年于天津大学获得博士学位, 现为山东理工大学副教授, 主要研究方向为非线性振动和 MEMS 传感器设计。

E-mail: lleisnowflake@sdu.edu.com

**Li Lei** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from China Agricultural University in 2013 and Ph. D. degree from Tianjin University in 2017. He is now an associate professor at Shandong University of Technology. His main research interests include nonlinear vibration and MEMS sensor design.