

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407969

基于锁频现象的质量传感器设计及检测性能分析^{*}

杨 威 张传森 李泰宇 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: 为了克服峰值频率对驱动幅值的依赖性,提高非线性谐振系统的频率稳定性,设计了一种基于机械双锁频现象的新型质量传感器。首先,构建三自由度磁耦合谐振系统模型,对谐振系统模型进行理论分析和动力学预测;其次,实验验证机械双锁频现象,并提出质量传感器的检测原理;最后,研究了耦合间距对第1次频率锁定、第2次频率锁定、检测量程、灵敏度和线性度的影响。实验结果表明,谐振系统的峰值频率在两个驱动电压区间内保持相对稳定,驱动电压为60~105 V时,出现第1次频率锁定现象,频率稳定在27.18 Hz左右;120~150 V的驱动电压下产生第2次频率锁定现象,频率稳定在27.61 Hz左右,且在两个稳定区间之间产生0.43 Hz的频移跳跃。利用第1次频率锁定-解锁位置和频率偏移能够实现吸附质量的检测,适当的增大耦合间距后,质量传感器检测量程由4 mg提升至5 mg,且灵敏度由0.09 Hz/mg增大到0.12 Hz/mg,证明了实现质量传感的可行性。所得结论提高了传感器峰值频率稳定性,并为质量传感器提供了一种新的可能性。

关键词: 模态耦合振动;频率稳定性;频率锁定;耦合间距;分岔传感器;质量传感器

中图分类号: TP212;TN79 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Design and detection performance analysis of a mass sensor based on frequency locking phenomenon

Yang Wei Zhang Chuansen Li Taiyu Tang Peiyuan Li Lei

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

Abstract: To address the dependence of peak frequency on driving amplitude and enhance the frequency stability of nonlinear resonant systems, a novel mass sensor based on the mechanical dual-frequency locking phenomenon has been designed. Initially, a three-degree-of-freedom magnetically coupled model was constructed to theoretically analyze and predict the dynamic behavior of coupled model. Subsequently, the mechanical dual-frequency locking phenomenon was experimentally verified, and the detection principle of the mass sensor was proposed. Additionally, the influence of coupling spacing on the first frequency locking, second frequency locking, detection range, and linearity was investigated. Experimental results demonstrated that the resonant system exhibits relatively stable peak frequencies within two distinct driving voltage intervals. Specifically, the first frequency locking was observed at a driving voltage of 60~105 V, with a stable frequency around 27.18 Hz. The second frequency locking appeared at a driving voltage of 120~150 V, with a stable frequency around 27.61 Hz, and a frequency shift jump of 0.43 Hz occurred between these two stable ranges. The detection of adsorbed mass was achieved by monitoring the first frequency-locking range and the associated unlocking position, combined with the corresponding frequency shift. By appropriately adjusting the coupling spacing, the detection range of the sensor for quality has been increased from 4 mg to 5 mg, and the sensitivity has increased from 0.09 Hz/mg to 0.12 Hz/mg. The conclusions drawn enhanced the peak frequency stability of the sensor and offered a new possibility for mass sensors.

Keywords: model coupled vibrations; frequency stability; frequency locking; coupling spacing; bifurcation sensors; mass sensor

0 引言

随着工业技术的高速发展,谐振式传感器的优越性在 21 世纪逐渐突出,在现代科技中扮演着不可或缺的角色,因其体积小、重量轻、功耗低、响应快、智能化等优点,目前已广泛应用于车辆检测、航空航天、精密仪器、生物技术、国防军事通讯等诸多领域的信号探测^[1-3]。传统的传感方法是基于线性响应的定量变化,将传感器谐振频率的可测量位移与目标刺激的结合联系起来^[4]。比如,在气体有害物质浓度检测中,谐振式气体传感器利用特异性敏感材料吸附有害气体分子,导致谐振器等效质量改变,进而引起谐振频率偏移。通过测量该频移,可实现对有害气体分子浓度的定量监测。但是,随着谐振装置的小型化,几何非线性、驱动非线性、阻尼非线性等使谐振器工作在非线性区域^[5-9],导致谐振频率依赖于驱动幅值。近年来的研究表明,在非线性系统中,当存在适当的内共振时,频率与振幅的相关性可以大大降低^[10]。例如,Ilyas 等^[11]设计了一种耦合谐振器,发现一旦发生内部共振,就会出现从目标模态到另一模态的能量转换,可以用来稳定谐振频率,提高谐振传感器的动态性能。Annino 等^[12]研究了耦合谐振器的 1:3 内共振,通过一阶模态与第 3 阶模态之间的非线性能量转移实现频率稳定。Zhang 等^[13]设计了一种基于 2:1 内共振的 T 型梁微型陀螺仪,发现内部共振显著提高了陀螺仪的响应带宽。Pu 等^[14]研究了一对固有频率比为 3:1 电耦合的机械振荡器,发现频率比 3:1 的高阶同步的振荡器频率稳定性提升了 10 倍。Li 等^[15]设计了一种机械耦合谐振结构,通过夹紧式微梁与悬臂式微梁的耦合实现稳频。并指出机械频率锁定现象可用于提高基于分岔的谐振传感器的鲁棒性。Wang 等^[16-17]实验研究了静电耦合三次非线性低频微谐振器和线性高频微谐振器的内部共振。当耦合强度超过一定值时,首次在两个谐振器的频率比为 1:3 时观察到频率锁定现象,频率锁定现象极大的增加了短时频率稳定性。Shi 等^[18]也研究了在两个机械耦合的非线性谐振器中,1:3 内共振诱导的幅值和频率锁定,幅值稳定性提高了将近一个数量级。通过上述研究可知,基于内共振产生的频率锁定现象为高性能传感器克服非线性带来的不利影响提供了一种新的可能性。传统的谐振结构只能通过耦合两种振动模式实现单次频率锁定,很大程度上限制了传感器的性能提升。所以,本文设计了一种三自由度(three-degree-of-freedom, 3-DOF)磁耦合谐振结构,能够实现双频率锁定。在此基础上,基于机械双锁频现象,设计了一种新型质量传感器。

本文通过理论分析,研究了低频模态和低频模态之间能量传递路径和频率锁定现象的产生条件。实验验证

了机械双锁频现象,通过监测第 1 次频率锁定的电压解锁位置以及频率偏移的变化,实现对质量的连续检测。改变耦合间距,研究了其对该传感器检测量程、灵敏度和线性度的影响,为高性能传感器设计提供了一种新的可能性。

1 谐振结构设计及分析

1.1 结构设计

本文设计了一种三自由度磁耦合谐振结构,如图 1 所示,由低频谐振梁、高频谐振梁、固定端、永磁体和陶瓷压电片组成。低频谐振梁 R_2 与高频谐振梁 R_1 、 R_3 阵列固定在基座上。 R_2 的根部贴有陶瓷压电片,且在 R_1 、 R_2 和 R_3 的端部吸合了一对 N35 钕铁硼永磁体,形成磁力耦合,力的表现形式为斥力。 R_1 和 R_3 端部永磁体可以吸附质量块。

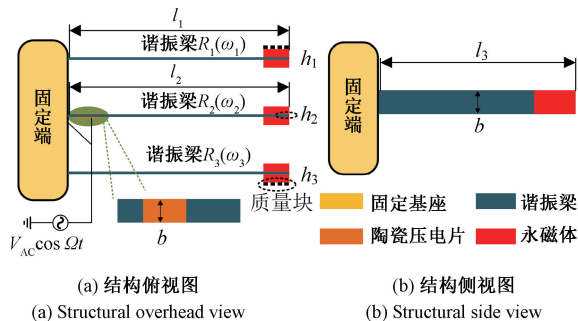


图 1 三自由度磁耦合谐振结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a 3-DOF magnetically coupled resonant structure

当信号发生器产生信号驱动 R_2 振动,通过磁耦合带动 R_1 和 R_3 振动,设计 3 根谐振梁的固有频率为 $3\omega_1 \approx \omega_2 \approx 3\omega_3$,当在 ω_2 附近扫频时,3 根谐振梁产生模态耦合行为。

R_1 、 R_2 和 R_3 的材料均为铍青铜, R_1 长 $l_1 = 38.5$ mm 厚 $h_1 = 0.5$ mm, R_2 长 $l_2 = 55$ mm 厚 $h_2 = 0.2$ mm, R_3 长 $l_3 = 39.5$ mm 厚 $h_3 = 0.5$ mm,陶瓷压电片厚 $h_p = 0.4$ mm;谐振梁的距离 $d = 14.0$ mm,谐振梁、压电片和磁铁的宽 b 均为 0.4 mm。

1.2 理论分析

首先,引入了三自由度集总参数理论模型,如图 2 所示。 R_2 由围绕其固有频率的扫频交流电压 $V_{AC}\cos\Omega t$ 压电驱动,谐振器被简化为三自由度磁耦合杜芬谐振模型。

当 R_2 受到简谐激励,模态在简谐激励下的耦合运动方程为:

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + k_1 u_1 - F_{m1} &= 0 \\ m_2 \ddot{u}_2 + c_2 \dot{u}_2 + k_2 u_2 + F_{m1} - F_{m2} &= F \cos \Omega t \end{aligned} \quad (1)$$

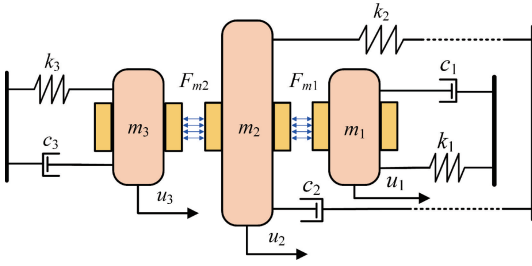


图2 三自由度磁耦合谐振梁结构集中参数模型
Fig. 2 3-DOF magnetically resonant beam structure with lump parameter model

$$m_3 \ddot{u}_3 + c_3 \dot{u}_3 + k_3 u_3 + F_{m2} = 0$$

其中^[19]:

$$m_1 = 33\rho b h_1 l_1 / 140 + 2\rho_m V_m, k_1 = E b h_1^3 / 4l_1^3$$

$$m_2 = 33\rho b h_2 l_2 / 140 + 2\rho_m V_m, k_2 = E b h_2^3 / 4l_2^3$$

$$m_3 = 33\rho b h_3 l_3 / 140 + 2\rho_m V_m, k_3 = E b h_3^3 / 4l_3^3$$

$$F = \frac{E E_p h_2 (h_2 + h_p) b d_{31}}{2(E h_2 + E_p h_p)} V [\phi_2'(x_a) - \phi_2'(x_b)]$$

式中: m_i 、 u_i 、 c_i 和 k_i ($i=1,2,3$) 分别代表谐振梁的等效质量、位移、等效阻尼和等效刚度; t 为时间; F 和 Ω 分别代表驱动力振幅和驱动频率; $d_{31} = -275$ pC/N, $\rho = 8\,300$ kg/m³ 和 $E = 128$ GPa 分别代表压电陶瓷常数、谐振梁的密度和杨氏模量; $\rho_m = 7\,800$ kg/m³ 和 $V_m = 40$ mm³ 分别是磁铁的密度和总体积; $E_p = 63$ GPa 为陶瓷压电片的杨氏模量; ϕ_2 表示 R_2 的模式振型函数; x_a 和 x_b 分别表示压电片的起始位置和终止位置。

为简化理论分析,不考虑压电作动器对低频谐振梁等效质量和等效刚度的影响,将永磁体建模为磁偶极子,磁化强度分别为 M_1 、 M_2 和 M_3 ,如图3所示。

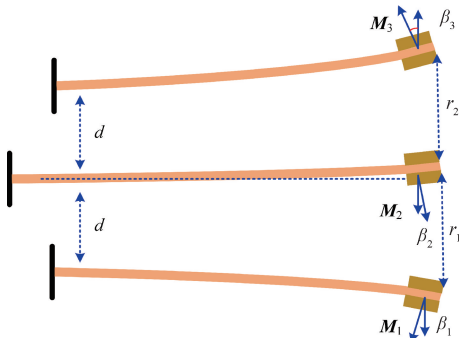


图3 谐振梁之间的磁耦合力构形图

Fig. 3 Configuration diagram of the magnetic coupling force among the three resonant beams

谐振梁之间的耦合磁力为^[20]:

$$F_{m1} = \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \left[\left(\nabla \frac{m_A r_1}{r_1^3} \right) \cdot m_B \right] \quad (2)$$

$$F_{m2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \left[\left(\nabla \frac{m_B r_2}{r_2^3} \right) \cdot m_C \right] \quad (3)$$

式中: μ_0 为空间磁导率; $r_1 = d + u_1 - u_2$ 和 $r_2 = d + u_2 - u_3$ 为相邻磁铁之间的距离; $m_A = |M_1| V_m \cos \beta_1$ 、 $m_B = |M_2| V_m \cos \beta_2$ 和 $m_C = |M_3| V_m \cos \beta_3$ 表示磁矩在垂直方向上的投影。

考虑在实际变形中 β_1 、 β_2 和 β_3 近似等于 0。通过泰勒展开,耦合磁力可以近似表示为:

$$F_{m1} = \frac{3\mu_0 m_A m_B}{2\pi d^4} - \frac{6\mu_0 m_A m_B}{\pi d^5} (u_1 - u_2) + \frac{15\mu_0 m_A m_B}{\pi d^6} (u_1 - u_2)^2 - \frac{30\mu_0 m_A m_B}{\pi d^7} (u_1 - u_2)^3 \quad (4)$$

$$F_{m2} = \frac{3\mu_0 m_B m_C}{2\pi d^4} - \frac{6\mu_0 m_B m_C}{\pi d^5} (u_2 - u_3) + \frac{15\mu_0 m_B m_C}{\pi d^6} (u_2 - u_3)^2 - \frac{30\mu_0 m_B m_C}{\pi d^7} (u_2 - u_3)^3 \quad (5)$$

将式(4)和(5)代入式(1)得到:

$$\ddot{u}_1 + \tilde{c}_1 \dot{u}_1 + \omega_1^2 u_1 - \tau_{1c} u_2 + \tau_{2c} (u_1^2 - 2u_1 u_2 + u_2^2) + \tau_{3c} (u_1^3 + 3u_1 u_2^2 - 3u_2 u_1^2 - u_3^3) = 0 \quad (6)$$

$$\ddot{u}_2 + \tilde{c}_2 \dot{u}_2 + \omega_2^2 u_2 - \tilde{\tau}_{1c} u_1 + \tilde{\tau}_{2c} (u_1^2 - 2u_1 u_2 + u_2^2) - \tilde{\tau}_{3c} (u_1^3 + 3u_1 u_2^2 - 3u_2 u_1^2 - u_2^3) - \tilde{\tau}_{4c} u_3 - \tilde{\tau}_{5c} (u_3^2 + u_2^2 - 2u_2 u_3) - \tilde{\tau}_{6c} (u_2^3 - u_3^3 + 3u_2 u_3^2 - 3u_3 u_2^2) = \tilde{F} \cos \Omega t \quad (7)$$

$$\ddot{u}_3 + \tilde{c}_3 \dot{u}_3 + \omega_3^2 u_3 - \tau_{4c} u_2 + \tau_{5c} (u_3^2 - 2u_2 u_3 + u_2^2) + \tau_{6c} (u_2^3 + 3u_2 u_3^2 - 3u_3 u_2^2 - u_3^3) = 0 \quad (8)$$

式中:

$$\tau_{1c} = \frac{6\mu_0 m_A m_B}{m_1 \pi d^5}, \tau_{2c} = \frac{15\mu_0 m_A m_B}{m_1 \pi d^6}, \tau_{3c} = -\frac{30\mu_0 m_A m_B}{m_1 \pi d^7}$$

$$\tau_{4c} = \frac{6\mu_0 m_B m_C}{m_3 \pi d^5}, \tau_{5c} = \frac{15\mu_0 m_B m_C}{m_3 \pi d^6}, \tau_{6c} = -\frac{30\mu_0 m_B m_C}{m_3 \pi d^7}$$

$$\tilde{\tau}_{1c} = \frac{6\mu_0 m_A m_B}{m_2 \pi d^5}, \tilde{\tau}_{2c} = \frac{15\mu_0 m_A m_B}{m_2 \pi d^6}, \tilde{\tau}_{3c} = -\frac{30\mu_0 m_A m_B}{m_2 \pi d^7}$$

$$\tilde{\tau}_{4c} = \frac{6\mu_0 m_B m_C}{m_2 \pi d^5}, \tilde{\tau}_{5c} = \frac{15\mu_0 m_B m_C}{m_2 \pi d^6}, \tilde{\tau}_{6c} = -\frac{30\mu_0 m_B m_C}{m_2 \pi d^7}$$

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1} + \tau_{1c}}, \omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2} + \tilde{\tau}_{1c} + \tilde{\tau}_{4c}}, \omega_3 = \sqrt{\frac{k_3}{m_3} + \tilde{\tau}_{4c}}$$

$$\tilde{F} = \frac{F}{m_2}$$

当发生多模态耦合振动时,高频谐振梁的幅值远小于低频谐振梁的幅值。因此,忽略高阶项和非共振项,得到:

$$\ddot{u}_1 + \tilde{c}_1 \dot{u}_1 + \omega_1^2 u_1 + \tau_{3c} u_2^3 = 0 \quad (9)$$

$$\ddot{u}_2 + \tilde{c}_2 \dot{u}_2 + \omega_2^2 u_2 + \tilde{\tau}_{3c}(3u_1 u_2 - u_2^3) - \tilde{\tau}_{6c}(u_2^3 - 3u_3 u_2^2) = \tilde{F} \cos \Omega t \quad (10)$$

$$\ddot{u}_3 + \tilde{c}_3 \dot{u}_3 + \omega_3^2 u_3 + \tau_{6c} u_2^3 = 0 \quad (11)$$

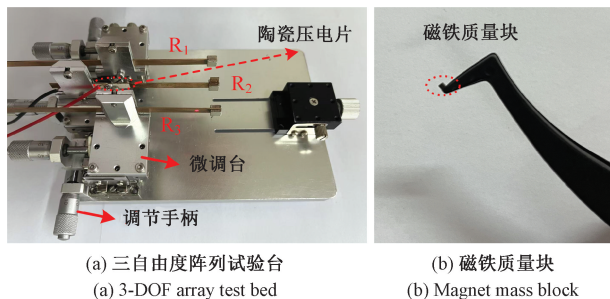
通过式(8)和(10)发现高频模态和一阶模态通过三次非线性耦合产生能量传递。

通过式(11)发现当驱动频率接近高频谐振梁固有频率的 1/3 时,等效阻尼达到最大值,引起谐振梁的振动能量从幅频响应曲线的上支路跳到下支路,可能会稳定峰值频率,造成频率锁定现象。

2 实验验证

2.1 搭建实验测试平台

搭建三自由度阵列实验台,如图 4(a)所示。为了调节谐振梁的磁耦合间距,使用型号为“LX40-C”移动滑台作为两侧固定基座。该滑台能够实现最小 0.01 mm 的调节,且最大调节行程为 ± 6.5 mm,通过调节手柄可以调节精确控制耦合间距。陶瓷压电片表面通过焊锡连接两根导线,用于外部驱动。



(a) 三自由度阵列试验台
(a) 3-DOF array testbed

(b) 磁铁质量块
(b) Magnet mass block

图 4 三自由度阵列实验台与磁铁质量块

Fig. 4 3-DOF array testbed and magnet mass block

通过切割钕铁硼和质量标定,制备了密度为 7.5 g/cm^3 , 尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的磁铁质量块,加工误差不得超过 $\pm 0.05 \text{ mm}$,保障每个磁铁质量块的质量为 1 mg,如图 4(b)所示。需要注意的是,用镊子向 R_1 和 R_3 端部永磁体附加 1 mg 的磁铁质量时,需均匀分布在永磁体表面。

搭建实验测试平台,主要包括信号发生器、功率放大器、直流电压源、激光位移传感器和 PC 端,如图 5 所示。信号发生器经过功率放大后产生的信号强迫激励陶瓷压电片,激光位移传感器检测谐振梁的振动位移,其中两个测点的位移分别代表两个谐振梁的振动。NI 数据采集卡将产生的位移信号收集并传递给 LabVIEW。

2.2 机械双锁频现象

在不同激励幅度下,对 R_2 进行正向扫频,驱动电压

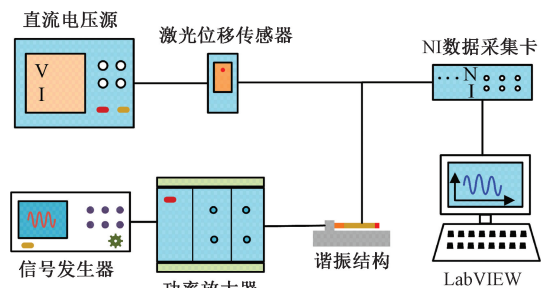


图 5 谐振梁实验测试平台

Fig. 5 Resonant beam experimental test platform

较小时 (15~45 V), 谐振系统不存在频率锁定现象, 由于刚度硬化, R_2 的峰值频率逐渐增大。

增大激励电压, 当驱动电压为 60 V 时, R_2 与 R_3 发生模态耦合振动, 由于两根梁产生强烈的能量交换, 导致第 1 次频率锁定现象, 如图 6(a) 所示。 R_2 的峰值频率几乎不变, 锁定在 27.18 Hz 左右, 如图 6(b) 所示。继续增大驱动电压, 第 1 次频率锁定现象消失, 但是 R_2 与 R_1 产生模态耦合振动, 导致第 2 次频率锁定现象, 频率锁定在 27.61 Hz 左右, 如图 6(c) 所示。

实验结果表明, 随着驱动电压的增加, 第 1 次和第 2 次频率锁定现象相继发生。当第 1 次频率锁定现象消失时, 产生了一段较大的频移和一个分岔点后进行了第 2 次频率锁定现象。虽然 R_2 的峰值频率和振幅都经历了从锁定到解锁的过程, 但产生的频移更加明显, 达到 0.43 Hz。将点 B_1 定义为关 (OFF), 将点 B_2 定义为开 (ON), 当第 1 次频率解锁时产生大的频移会激活开关, 这种检测方式将有助于提高信噪比, 从而提高分岔二进制传感器的分辨率。

3 传感器工作原理

本文提出了两类不同工作原理的质量传感器。其中, 解锁型质量传感器是指通过检测第 1 次频率解锁电压的位置来实现对质量的连续测量; 而频移型质量传感器则是指在第 1 次频率解锁后, 通过检测频移量的变化来实现对质量的连续测量。

3.1 基于频率解锁电压检测

基于频移检测原理, 首先向 R_3 与 R_1 吸附 1~4 mg 质量。对 R_3 吸附 1 mg 质量时, 随着驱动电压的增加 (15~45 V), 峰值频率首先从 26.59 Hz 增大到 27.15 Hz 左右; 增大驱动电压 (60~105 V), 峰值频率稳定在 27.18 Hz 左右; 当驱动电压超出 105 V 时 ($V \geq 120$ V), 第 1 次频率解锁, 频率稳定在 27.61 Hz 左右, 如图 7 所示。

吸附质量为 2 mg 时, 峰值频率也经历了首先急剧增大 (15~45 V) 后稳定在 27.12 Hz 左右的过程; 当驱动

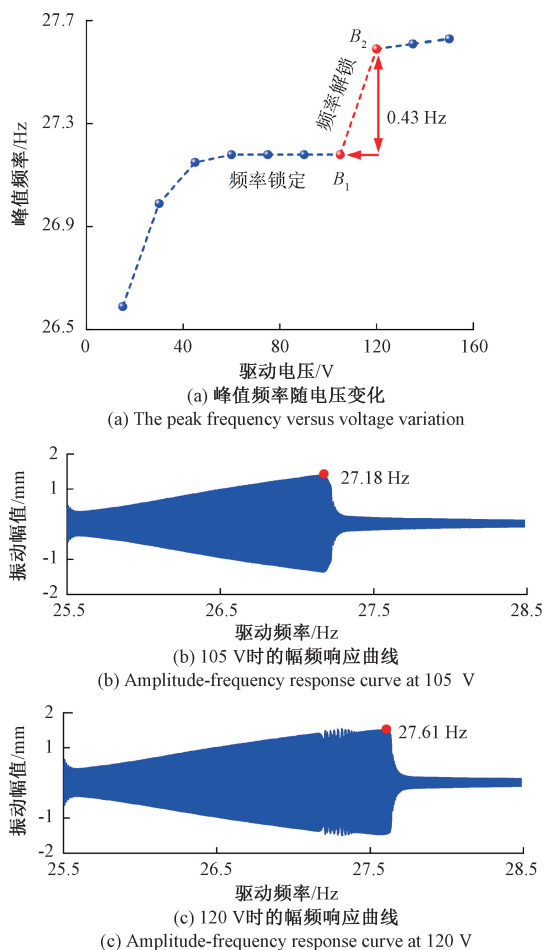


图 6 峰值频率随电压变化和点 B_1 、 B_2 所对应的幅频响应曲线

Fig. 6 The graph of peak frequency varying with voltage and the amplitude-frequency response curves corresponding to points B_1 and B_2

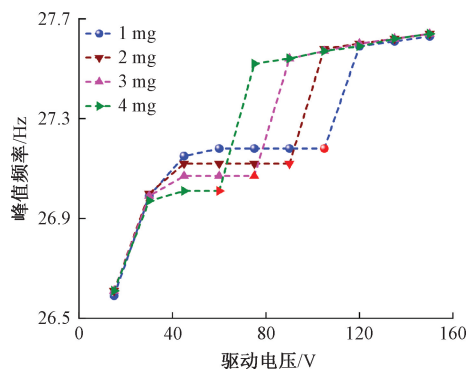


图 7 R_3 不同吸附质量下的扫频图

Fig. 7 Frequency-sweep response spectra of R_3 under varying adsorbed mass conditions

大于 90 V 时 ($V \geq 90$ V), 进行了频率解锁, 电压解锁位置为 90 V。吸附质量为 3 和 4 mg 时, 第 1 次频率解锁的电

压位置分别为 75 和 60 V。这是因为 R_3 吸附了质量后, 改变了谐振梁的固有频率。 ω_3 的减小使第 1 次锁频解锁电压逐渐降低, 第 1 次锁频范围逐渐变窄, 导致了第 2 次频率锁定现象的临界驱动电压减小。

第 2 次频率锁定现象的临界驱动电压逐渐减低, 但第 2 次频率锁定的峰值频率几乎不变, 稳定在 28.61 Hz 左右。这说明利用吸附质量改变第 1 次频率锁定的范围和电压解锁位置时, 第 2 次锁定频率并不会因此改变, 提高了系统的整体稳定性。

接下来, 实验测量了耦合间距为 14.0 mm (原始间距) 和 14.3 mm 下第 1 次频率锁定的临界电压。如图 8 所示, 当耦合间距为 14.0 mm 时, 吸附质量与第 1 次解锁电压呈线性关系, 表现出良好的检测量化特性。

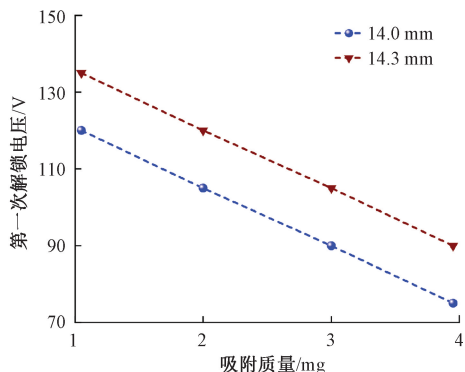


图 8 不同耦合间距下第 1 次频率锁定解锁电压

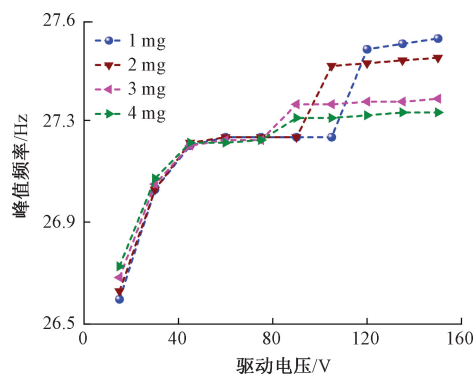
Fig. 8 Unlock voltage at the first frequency locking for different coupling spacings

增大耦合间距至 14.3 mm, 吸附质量与第 1 次解锁电压仍呈线性关系, 但频率解锁电压较耦合间距为 14.0 mm 时有所增大。这是由于耦合间距的增加会导致耦合强度和三次方非线性刚度均减小, 谐振系统达到相同峰值频率所需的驱动能量进而增加, 临界驱动电压随之升高。

对于解锁型质量传感器, 吸附质量通过改变谐振梁的等效质量, 引起系统固有频率降低, 从而导致频率锁定状态在临界驱动电压阈值处提前解锁, 这一现象具体表现为首次频率解锁电压位置的显著变化。实验研究表明, 耦合间距的增大会削弱耦合元件间的相互作用强度与非线性刚度, 进而对谐振系统的动态行为产生显著调控作用, 表现为促使临界驱动电压阈值升高。

3.2 基于频移大小检测

对 R_1 吸附 1 mg 质量, 随着驱动电压的增加 (15 ~ 45 V), 峰值频率首先增大; 增大驱动电压 (60 ~ 105 V), 第 1 次频率锁定现象出现; 当继续增大驱动电压 ($V \geq 120$ V), 第 1 次频率解锁, 解锁产生的频移为 0.32 Hz, 如图 9 所示。

图 9 R_1 不同吸附质量下的扫频图Fig. 9 Frequency-sweep response spectra of R_1 under varying adsorbed mass conditions

当吸附质量为 2~4 mg 时,第 1 次频率解锁的峰值频率频移分别为 0.26、0.2 和 0.08 Hz。这是因为 ω_1 的变化主要影响了第 2 次锁定频率。随着 ω_1 的减小,第 2 次锁定频率也逐渐减小,导致第 1 次频率解锁后的频移减小。利用第 1 次频率解锁后频移的大小也可以对质量进行连续检测。

实验测量了不同耦合间距下频率解锁后产生的频移大小。在吸附 1 mg 质量后,不同耦合间距下的频移分别为 0.32 和 0.43 Hz,如图 10 所示。研究发现,对于频移型质量传感器,适当地增大耦合间距可以在增大频率解锁后产生的频移。

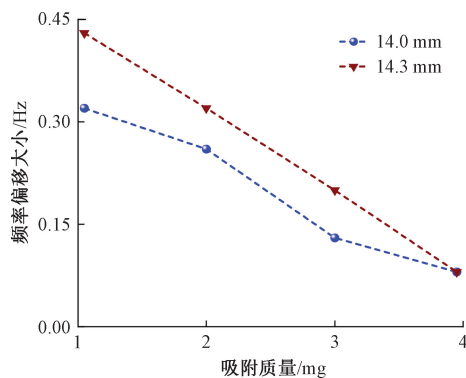


图 10 不同耦合间距下的频移大小

Fig. 10 Frequency shift magnitude at different coupling distances

综上,改变耦合间距,研究了第 1 次解锁电压和频率偏移的变化,提出了两种可行的质量检测方式。发现耦合间距可以改变第 1 次频率解锁的电压位置和解锁后产生的频移大小。适当地增大耦合间距可以分别提高两种检测方式的频率检测电压和频移大小,耦合间距为 14.3 mm 时有表现出更好的检测潜力。

4 传感器性能分析

4.1 传感器检测量程分析

研究了耦合间距变化对解锁型传感器检测量程的影响。第 1 次锁频的临界电压与解锁电压共同决定了解锁型质量传感器的检测量程,其中临界电压标志着锁频起始阈值,解锁电压定义了锁频状态的终止阈值。两者的电压区间构成了检测量程,确保在设定电压范围内精准识别锁频与解锁状态。

耦合间距的增大使耦合系数减小,磁耦合之间的相互作用减弱。系统的稳定性边界发生变化,维持频率锁定需要更宽的频率范围来实现,导致第 1 次锁频范围扩大。如图 11 所示,耦合间距的增大,使质量传感器的电压检测量程由 45 V 增加到 60 V。由图 7 可知,每吸附 1 mg 质量,第 1 次频率解锁电压便下降 15 V。当间距增大 0.3 mm,传感器质量检测量程由 4 mg 增加到 5 mg。适当的增大耦合间距可以提高解锁型传感器的质量检测量程。

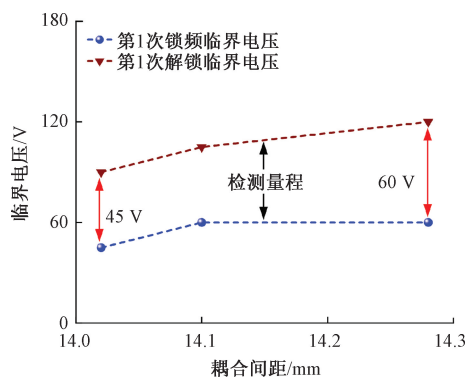


图 11 不同耦合间距下的临界电压和频移大小

Fig. 11 Critical voltage and frequency shift magnitude at different coupling gaps

4.2 传感器灵敏度分析

对于解锁型质量传感器,以附加质量为输入量、频率解锁电压位置为输出量,曲线的斜率便为该质量传感器的灵敏度曲线。如图 12 所示,不同耦合间距为下,解锁型质量传感器的灵敏度均为 15 V/mg。

线性度是质量传感器的关键参数,表征输入与输出之间的线性关系程度。确保传感器在特定范围内具备高分辨率,并简化数据处理流程。通过对传感器输入输出关系曲线进行线性拟合,所得到的相关度即为线性度。解锁型质量传感器的相关系数为 1,其输出与输入之间的线性关系接近理想状态。

对于频移型质量传感器,在 14.0 mm 时,检测灵敏度为 0.09 Hz/mg;增大耦合间距后,灵敏度增加到

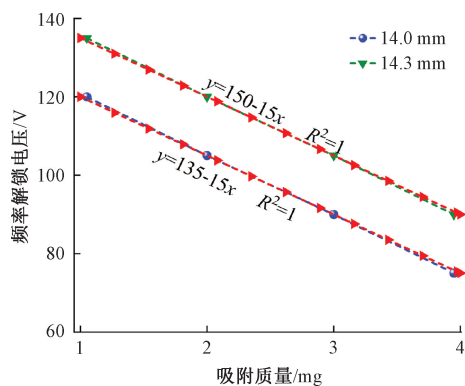


图12 电压解锁位置拟合曲线

Fig. 12 Voltage unlock position fitting curve

0.12 Hz/mg,如图13所示。频移型质量传感器在较低耦合间距下,单位质量变化所产生的频移量呈现非恒定特性,导致其线性度较差。增大耦合间距,相关系数增大为0.999,这是由于较大的耦合间距降低了谐振系统对外部质量负载的敏感性,使频移与吸附质量之间呈现更为稳定的线性关系。适当的增大耦合间距可以提高频移型质量传感器的灵敏度和线性度。

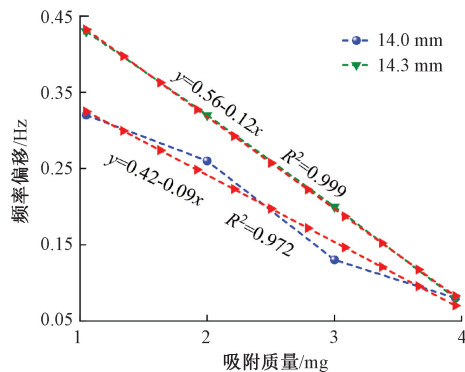


图13 频率偏移拟合曲线

Fig. 13 Frequency offset fitting curve

5 结 论

本文设计了一种基于机械双锁频现象的质量传感器,建立了其动力学模型并进行了理论分析,实验验证了机械双锁频现象,提出了质量传感器的工作原理,研究了耦合间距对该质量传感器的影响,发现了适当的增大耦合间距,可以增大解锁型质量传感器的检测量程,还可以提高频移型质量传感器的灵敏度和线性度。在两侧谐振梁端的永磁体上吸附相关涂层进行污染物吸附,当排放污染物超过检测阈值,传感器会通过频率解锁位置或者频移大小的变化激活开关,从而发出警报或触发后续处理措施,可用于检测汽车尾气污染物的排放。在将来的研究中,需要对其 $N-1$ ($N>3$)次频率锁定现象展开详细

研究,为高频率稳定性的多通道多质量传感器提供一种新的可能性。

参考文献

- [1] 王桂从,赵鹏,李映君,等. 压电薄膜三维重载力传感器设计与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1): 11-19.
WANG G C, ZHAO P, LI Y J, et al. Design of experiment of PVDF piezoelectrics film 3-D heavy load force sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 11-19.
- [2] 肖行,樊尚春. 石墨烯谐振式微质量传感其研究进展[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 1-6.
XIAO X, FAN SH CH. Research progress of graphene resonant micromass sensor [J]. Metrology and Measurement Technology, 2021, 41(6): 1-6.
- [3] 张宇,许高斌,尹盛华,等. 多梁凹槽高g值加速度计的设计与分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 90-97.
ZHANG Y, XU G B, YIN SH H, et al. Design and analysis of multi-beam groove high g-value accelerometer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 90-97.
- [4] HANAY M, NGUYEN V H, ARABI M, et al. Highly sensitive self-actuated zinc oxide resonant microcantilever humidity sensor[J]. Nano Letters, 2022, 22(8): 3196-3203.
- [5] KILINC Y, KARAKAN M C, LEBLEBIC Y, et al. Observation of coupled mechanical resonance modes within suspended 3D nanowire arrays[J]. Nano Letters, 2020, 43: 22042-22048.
- [6] ALNEAMY A M, OUAHAD H M. Inertia mass biosensors based on snap-through phenomena in electrostatic MEMS shallow arch resonators [J]. The International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 238: 107825.
- [7] 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.
- [8] GOBAT G, ZEGA V, FEDELI P, et al. Frequency combs in a MEMS resonator featuring 1:2 internal resonance: AB initio reduced order modelling and experimental validation[J]. Nonlinear Dynamics, 2023, 111: 2991-3017.
- [9] YUAN Q, KANG H, ZHAO Y, et al. Parametric resonance of multi-frequency excited MEMS based on homotopy analysis method [J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2023, 125: 107351.
- [10] ZANETTE D H. Stability of two-mode internal resonance

- in a nonlinear oscillator[J]. *European Physical Journal B*, 2018, 91: 89.
- [11] ILYAS S, CHAPPANDA K N, YOUNIS M I. Exploiting nonlinearities of micro-machined resonators for filtering applications [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(25): 253508.
- [12] ANTONIO D, ZANETTE D H, LÓPEZ D. Frequency stabilization in nonlinear micromechanical oscillators[J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 806.
- [13] ZHANG K P, ZHU J, HAO S Y, et al. Nonlinear vibration and performance analysis of a hybrid-driving T-beam micro-gyroscope with 2:1 internal resonance[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2023, 111: 10835-10857.
- [14] PU D, HUAN R H, WEI X R. Micromechanical vibration absorber for frequency stability improvement of DETF oscillator[J]. *AIP Advances*, 2017, 7: 035204.
- [15] LI L, LIU H B, SHAO M Y, et al. A novel frequency stabilization approach for mass detection in nonlinear mechanically coupled resonant sensors [J]. *Micromachines*, 2021, 12(2): 178.
- [16] WANG X F, HUAN R H, ZHU W Q, et al. Frequency locking in the internal resonance of two electrostatically coupled micro-resonators with frequency ratio 1:3[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 106981.
- [17] WANG X F, HUAN R H, ZHU W Q, et al. Amplitude region for triggering frequency locking in internal resonance response of two nonlinearly coupled micro-resonators [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2021, 130: 103673.
- [18] SHI Z, PU D, HUAN R H, et al. Mode interaction induced response flattening in two mechanically coupled micro-resonators [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 177: 109164.
- [19] LI L, LIU H B, LI D F, et al. Theoretical analysis and experiment of multi-model coupled vibration of Piezo-driven Π -shape resonant [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2023, 192: 110223.
- [20] 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.

作者简介



杨威, 2022 年于安阳工学院获得学士学位, 现为山东理工大学硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS 传感器设计。

E-mail: 19553345707@163.com

Yang Wei received his B. Sc. degree from Anyang Institute of Technology in 2022.

He is currently a M. Sc. candidate at Shandong University of Technology. 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@sdut.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 currently an associate professor at Shandong University of Technology. His main research interests include the nonlinear vibration and MEMS sensor design.