

文章编号 1004-924X(2025)23-3714-09

弱耦合谐振式超高灵敏度微力传感器

王徐康^{1,2}, 黄强先^{1,2}, 郭天武^{1,2}, 程荣俊^{1,2*}, 李红莉^{1,2}, 张连生^{1,2}

(1. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:针对高灵敏度、高分辨力的微力测量需求,提出并研制了基于模态局部化技术的弱耦合谐振式微力传感器。采用铍青铜耦合谐振器与柔性杠杆相结合的复合式结构,通过检测振幅比变化的方式测量微力,利用柔性铰链结构将被测微力高效转化为受扰动谐振器的轴向刚度变化,从而实现了超高的微力测量灵敏度。运用理论分析与仿真计算结合的方法验证了设计模型的合理性,搭建谐振器机械振幅测量及微力标定实验装置对传感器的性能指标进行了实验测试。实验结果表明,所研制的弱耦合谐振式微力传感器的量程为0~120 mN,相对灵敏度超过 $135.05 \times 10^{-6}/\mu\text{N}$,相较于应变式微力传感器的相对灵敏度提升4 600倍以上,分辨力优于30 μN 。该研究验证了弱耦合谐振式微力传感器结构方案的可行性,为超高灵敏度微力测量提供了新的思路。

关键词:微力传感器;弱耦合谐振器;模态局部化;振幅比输出;振幅比输出

中图分类号:TP212 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253323.3714 CSTR:32169.14.OPE.20253323.3714

Weakly coupled resonant ultra-high sensitivity micro-force sensor

WANG Xukang^{1,2}, HUANG Qiangxian^{1,2}, GUO Tianwu^{1,2}, CHENG Rongjun^{1,2*},

LI Hongli^{1,2}, ZHANG Liansheng^{1,2}

(1. School of Instrument Science and Opto-Electronic Engineering, Hefei University of Technology,
Hefei 230009, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Measuring Theory and Precision Instrument, Hefei 230009, China)

* Corresponding author, E-mail: chengrj@hfut.edu.cn

Abstract: To overcome the limitations of traditional micro-force sensors in complex measurement scenarios requiring high sensitivity and high resolution, a weakly coupled resonant micro-force sensor based on mode localization technology is proposed and developed. A hybrid architecture is adopted, in which a beryllium bronze coupled resonator is integrated with a flexible lever mechanism, enabling micro-force measurement through monitoring of the amplitude ratio. By employing a flexure hinge structure, the applied micro-force is efficiently transformed into an axial stiffness variation of the perturbed resonator, thereby achieving ultra-high measurement sensitivity. The validity of the design model is verified through theoretical analysis and numerical simulation. An experimental system is constructed for mechanical amplitude

收稿日期:2025-06-30;修订日期:2025-07-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52305575);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. JZ2024HG TB0196);安徽省自然科学基金资助项目(No. 2208085ME137)

measurement and micro-force calibration, allowing comprehensive evaluation of sensor performance. Experimental results indicate that the developed micro-force sensor provides a measurement range of 0-120 mN, a relative sensitivity exceeding $135 \times 10^{-6} / \mu\text{N}$ -more than 4,600 times higher than that of conventional strain-type micro-force sensors-and a resolution better than 30 μN . These results confirm the feasibility of the weakly coupled resonant structural scheme and demonstrate a novel approach for ultra-high-sensitivity micro-force measurement.

Key words: micro-force sensor; weakly coupled resonators; mode localization; ultra-high sensitivity; amplitude ratio output

1 引言

微力测量在精密加工^[1]、生物医学^[2]、航空航天^[3]等领域应用广泛。目前,传统的微力传感器根据测量原理可分为天平式^[4]、扭摆式^[5]、摆锤式^[6]、悬臂梁式^[7]、电阻应变片式^[8]和光纤式^[9]等。尽管这些类型的传感器已在工业、医疗和航空领域得到了广泛应用,但面对高灵敏度、高分辨力需求的复杂测量时,仍有较多局限性,如天平式微力传感器原理简单且灵敏度高,但平衡状态不易保持,稳定性较差;扭摆式微力传感器操作简单、精度高,但受振动影响大,承载能力有限;电阻应变片式微力传感器动态性能和静态性能好、结构简单、尺寸小,但阻尼比太小,有效频带小;压电式微力传感器动态性能好、灵敏度高、稳定性好,但应力计算复杂,受电磁力影响大。

模态局部化效应作为一种新兴的高灵敏度检测技术,近年来备受关注^[10]。该技术通过构建两个及以上弱耦合谐振器组成的系统,以振幅比作为核心输出信号,能够显著提升对微小扰动的检测灵敏度。相比于传统依赖频率变化的谐振式传感器技术,基于振幅比输出的模态局部化谐振式传感器尽管其线性度较低,却具备更高的检测灵敏度,无需高精度频率测量,在精密测量领域具有广阔的应用前景。研究表明,基于模态局部化技术的传感器在加速度^[11]、质量^[12-13]、电压^[14]、磁场^[15]等物理量的测量中表现出优异性能,其灵敏度相较传统方法可提升 2~3 个数量级^[16],并在共模噪声抑制方面效果显著^[17]。然而,尽管该原理在多个领域取得了一定成果,但在微力传感方面的研究仍较为有限,微力测量灵敏度和分辨力提升等关键问题尚待深入探讨。

模态局部化传感器主要分为质量扰动型与刚度扰动型,其中,采用刚度扰动机制的传感器是通过改变谐振器的弯曲刚度实现检测。理论表明,沿谐振器轴向施加扰动对刚度的影响最为显著。但当前大多模态局部化传感器的扰动方向与轴向存在夹角,导致能量耦合效率降低,测量灵敏度受到制约。因此,扰动沿轴向高效作用于谐振器,是提升刚度扰动型模态局部化传感器灵敏度的关键。

本文设计了基于模态局部化技术的压电激励耦合谐振式微力传感器,通过检测振幅比变化的方式实现微力测量。引入柔性铰链结构,可以有效地将微力转化为谐振器轴向刚度,同时过滤高频振动或噪声,提升系统的稳定性和测量精度。通过理论分析和仿真计算,验证设计模型的合理性,搭建了谐振器机械振幅测量及微力标定实验装置,并对微力传感器的性能进行实验测试。

2 敏感原理与结构设计

2.1 微力敏感原理

依据模态局部化理论,二自由度弱耦合谐振器系统包含两个相同的谐振器以及耦合结构,并且耦合结构的等效耦合刚度远远小于各谐振器的有效刚度。在外部激励作用下,耦合谐振器被激励达到谐振状态。初始工作状态下,两个谐振器均不受外力扰动,由于其结构相同,二者的振动幅值也相同。当对某一谐振器施加微力扰动时,其刚度会变化,此时两个谐振器振幅不再相同,产生模态局部化现象,即一个谐振器振幅增大,而另一个谐振器振幅减小。因此,通过检测

两个谐振器的振幅比可以确定微力的大小。弱耦合谐振器系统可简化为二自由度质量-弹簧-阻尼系统,如图 1 所示。

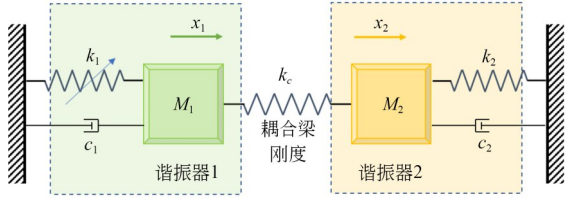


图 1 弱耦合谐振器物理模型

Fig. 1 Physical model of weakly coupled resonators

由于两个谐振器的几何参数相同,二者的有效质量和有效刚度相同,即 $m_1 = m_2 = m$ 和 $k_1 = k_2 = k$, 阻尼系数分别为 $c_1 = c_2 = c$, 两谐振器之间的有效耦合刚度为 k_c , 其中 $k_c \ll k_1, k_2$ 。两谐振器仅在 x 方向上同向或反向振动,位移量分别为 x_1 和 x_2 。此时二自由度系统的运动微分方程组为:

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d^2 x_1}{dt^2} \\ \frac{d^2 x_2}{dt^2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k + \Delta k + k_c & -k_c \\ -k_c & k + k_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0, \quad (1)$$

式中 Δk 表示有效刚度扰动,其表达式为:

$$\Delta k = F \cdot \lambda_k \cos \theta, \quad (2)$$

其中: F 表示待测微力扰动, λ_k 表示受扰动谐振器轴向力与其刚度变化的有效比例因子, θ 表示微力方向与谐振器轴线方向的角度。

通过求解式(1),可得到系统受扰动微力 F 后两个谐振器的振幅比为:

$$R_A = \frac{x_2}{x_1} = \frac{\Delta k + \sqrt{\Delta k^2 + 4k_c^2}}{2k_c}. \quad (3)$$

对式(3)进行偏导运算,可得到振幅比对微力扰动变化量的灵敏度为:

$$S_{AR} = \frac{\partial R_A}{\partial F} = \frac{\left(\lambda_k \cos \theta + \frac{F \cdot \lambda_k^2 \cos^2 \theta}{\sqrt{F^2 \cdot \lambda_k^2 \cos^2 \theta + 4k_c^2}} \right)}{2k_c}. \quad (4)$$

当 $k_c \ll \Delta k$ 时,传感器灵敏度公式可近似为:

$$S_{AR} \approx \frac{\lambda_k \cos \theta}{k_c}, \quad (5)$$

由此可以看出,微力扰动方向与谐振器轴线方向夹角越小,其振幅比灵敏度越高。减小耦合刚度 k_c 也可以提升振幅比灵敏度,但耦合刚度不能无限减小, k_c 过小会降低第一和第二特征模式的频率间隔,从而使得系统的耦合动力学特性恶化^[18]。最佳耦合刚度时耦合常数 $\kappa (\kappa = k_c/k)$ 的最小值被限制为:

$$\kappa \approx \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} \geq \frac{1}{Q}, \quad (6)$$

其中: ω_1 和 ω_2 表示谐振器系统的一二阶频率, Q 表示耦合谐振器的品质因子。

2.2 结构设计

为了实现超高灵敏度微力测量,这里提出了由弱耦合谐振器和力放大杠杆组成的复合式结构,如图 2 所示。耦合谐振器由谐振器 1(受扰动)和谐振器 2(无扰动)以及耦合梁组成。力放大杠杆结构采用了圆弧形柔性铰链,以保证微力输入通过弹性变形精确传递,避免了传统铰接结构中的摩擦损耗与装配间隙。该设计有效地减少了刚性连接引起的应力集中,避免了因过度约束而导致的测量误差。此外,柔性铰链还可以滤除不必要的高频振动或噪声,以提升系统的稳定性和测量精度。力放大杠杆结构固定在夹具上,长端施加微力扰动,短端则与谐振器 1 相连,当待测微力扰动作用在力杠杆长端时,短端的谐振器固定处会将微力扰动放大。由于放大后的微力扰动直接作用于轴线方向,其作用方向与轴向几乎完全重合,减少了非轴向分量的损耗,使扰动能量更集中地转化为谐振器的刚度调制。相较

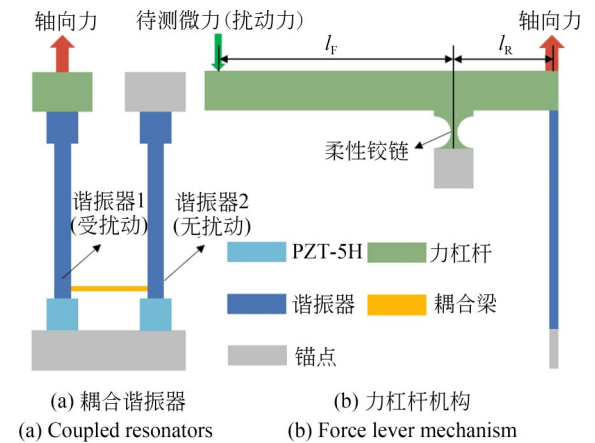


图 2 谐振式微力传感器示意图

Fig. 2 Schematic diagram of resonant micro force sensor

于常规模态局部化传感器存在扰动方向与谐振器轴向存在夹角的情况,该设计使得受扰动谐振器刚度变化更为显著,从而提升微力测量的灵敏度。依据模态局部化效应,两个谐振器的振幅随待测微力扰动而发生变化,通过检测两个谐振器的振幅比即可获得微力值。

传感器的灵敏度与敏感结构的截面形式、尺寸和材料参数等密切相关。其中,耦合刚度的设计较为关键,会影响两个谐振器间的耦合效率,需要综合考虑耦合谐振器各阶模态频率和品质因数。考虑到谐振系统工作在空气环境中,依据品质因数得到耦合常数需满足 $\kappa \geq 0.01$,此时第一、第二特征模态频率间隔大于 3 dB。而根据式(5)可知,为提升弱耦合谐振器的振幅比灵敏度,需要降低耦合梁刚度,即减小第一、第二特征模态频率间隔,但频率间隔过小,无法产生模态局部化现象。因此,根据所设计的结构,通过优化耦合梁的宽度以调整最佳的耦合刚度,以提高系统的耦合效率和灵敏度。微力传感器的结构参数如表 1 所示。

表 1 微力传感器结构参数

Tab. 1 Structural parameters of micro-force sensor(mm)

结构名称	尺寸参数
谐振器	22×2×0.05
耦合梁	10×0.5×0.05
压电陶瓷	4×4×0.15
杠杆长端长度 l_F	37.5
杠杆短端长度 l_R	12.5

由于模态局部化现象发生在谐振器的特征模态,故采用压电陶瓷激励谐振器振动至特定模态,激振信号为正弦激励信号。为保证耦合谐振器长期振动时的谐振精度,材料采用具有高强度与高弹性特点的铍青铜;谐振器端部采用高强度环氧树脂胶粘贴 PZT-5H 压电片用于激励其稳定振动;柔性铰链采用 7075 铝合金,该材料在反复弯曲过程中不易断裂,确保耦合谐振器能敏感微小力的扰动,实现高精度的微力测量。加工装配后的弱耦合谐振式微力传感器如图 3 所示。

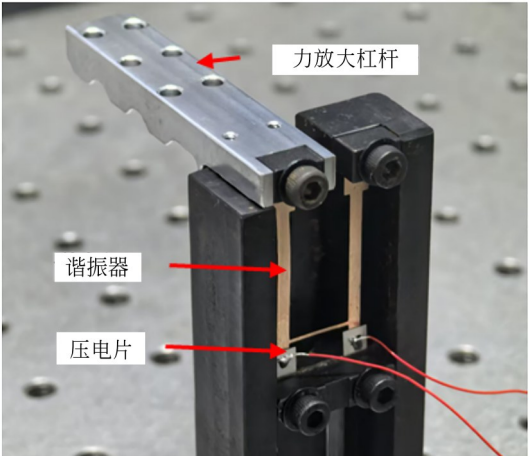


图 3 弱耦合谐振式微力传感器

Fig. 3 Weakly coupled resonant micro-force sensor

2.3 仿真验证

为验证弱耦合谐振式微力传感器结构设计的可行性,构建了模态局部化有限元仿真模型,分析了耦合谐振器的振动模态,前三阶谐振模态和谐振频率如图 4 所示。耦合谐振器的一阶频率为 646.79 Hz,二阶频率为 653.68 Hz,该耦合谐振器的耦合常数为 0.010 7,满足最佳耦合刚度设计的条件。

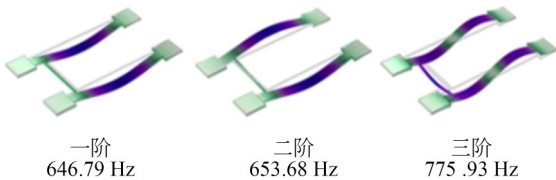


图 4 耦合谐振器前三阶模态

Fig. 4 First three modes of coupled resonator

由于两谐振器结构参数一致,当传感器未受微力扰动时,耦合谐振器的频率响应仿真曲线如图 5 所示。在一阶、二阶频率处出现两个谐振峰,两个谐振器的振幅完全相等。当受扰动谐振器受到正刚度微力扰动时,第一阶模态对应的振幅比对微力扰动的灵敏度高于其他阶模态。因此,当测量正刚度扰动方向的微力时,通过在压电陶瓷片上施加一阶频率的正弦信号激励耦合谐振器,使它工作在第一阶模态,即同向振动模态。

利用有限元仿真模拟方法,通过在杠杆一端施加载荷力,来模拟被测微力扰动,绘制不同耦合梁宽度的耦合谐振器以振幅比作为输出的灵

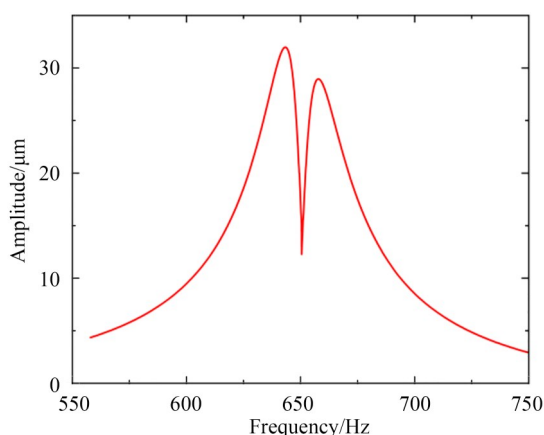


图5 未受扰动时耦合谐振器的频率响应仿真曲线

Fig. 5 Frequency response simulation curve of coupled resonator without disturbance

敏度曲线,如图6所示。仿真结果表明,耦合梁宽度为0.5 mm时,传感器的相对灵敏度最大,为 $140.52 \times 10^{-6} / \mu\text{N}$,验证了传感器结构及参数设计的合理性。

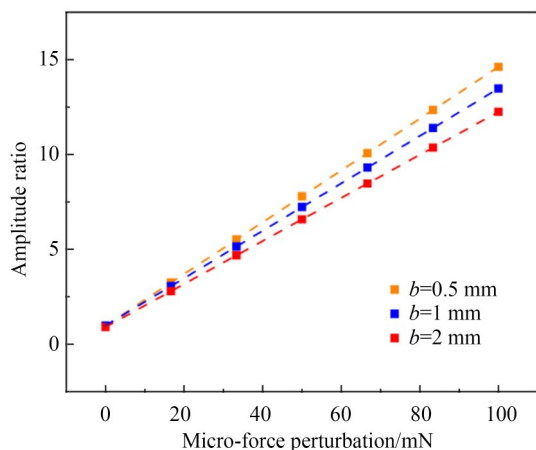


图6 不同耦合梁宽度下微力扰动对振幅比的影响

Fig. 6 Influence of micro-force disturbance on amplitude ratio under different coupling beam widths

3 性能测试

3.1 实验装置

本文搭建了谐振梁机械振幅测量及微力标定实验装置,以测试微力传感器的性能,如图7所示。弱耦合谐振器通过夹具固定在气浮光学平台上,谐振器激励由信号发生器产生正弦交流信

号,再通过功率放大器对谐振器进行激励。虽然增加激励电压可以增大振幅并提升系统的灵敏度与分辨力,但同时也加剧了系统不稳定性,并且由于压电片激励电压限制,在实验中激励电压的峰峰值设置为60 V。传感器两个谐振器的机械振幅由激光测振仪测量,其型号为LV-S01,位移测量分辨力4 nm,线性误差小于1%。在振幅测量时,调整多普勒测振仪的激光发射器以确保激光光斑能够垂直入射到谐振梁中间部位,即谐振梁机械振幅最大值处。

为实现对微力的精确标定,通过微动台向高精度测力计固定端施加纳米级位移,使测力计测力端与固定端产生相对位移,通过对机械位移的可控调节产生作用于谐振器上的微力,即将量化的位移量直接转化为被测微力扰动,确保测量结果的准确性和可靠性。使用Aerotech微动台作为微动机构,其型号为QNP-50-250L,闭环定位精度0.50 nm,为施加微力提供了一个可靠且可重复的机制。测力计高精度显示待测微力值作为标准量,其一端固定在微动台上,另一端则通过力放大杠杆与谐振器的扰动施加固定端相连。当微动台施加微位移时,测力计会产生相应的形变,通过监测测力计的示数即可知施加的微力扰动量值。测力计型号为AR-8091,量程为0~1 N,综合误差小于0.01%。

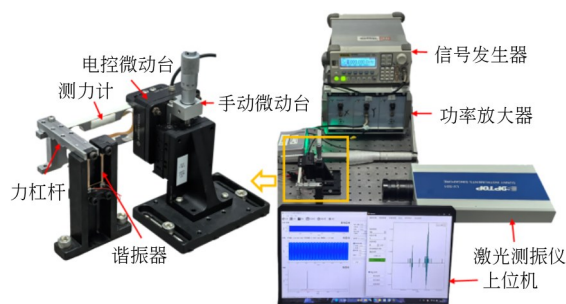


图7 机械振幅测量及微力标定实验平台

Fig. 7 Mechanical amplitude measurement and micro-force calibration experimental platform

3.2 测量实验与结果

微力传感器性能测试实验装置的底座与光学气浮平台刚性连接,测试系统外部设有防尘罩,可大幅阻隔外部气流扰动,实验室环境温度

为 $(20 \pm 0.5)^\circ\text{C}$, 环境湿度约为 55% RH, 大气压约 100.372 kPa。受加工误差和装配应力的影响, 两谐振器的结构参数并不完全一致, 实验中通过对谐振器 1 施加预应力调节刚度的方法来尽可能减小其对测量精度的影响, 使两谐振器初始谐振频率和振幅基本一致后开展测力实验, 输入扰动待振幅稳定后记录两谐振器的振幅数据。

3.2.1 灵敏度测试

为测试弱耦合谐振式微力传感器的灵敏度, 控制微动台使微力扰动在 $0 \sim 120\text{ mN}$ 内变化。图 8 显示了两个谐振器的振幅比与施加微力扰动的关系曲线, 随着微力从 0 增加到 120 mN , 受扰动谐振器 1 振幅从 $32.32\text{ }\mu\text{m}$ 急剧减小到 $2.89\text{ }\mu\text{m}$, 谐振器 2 振幅从 $32.78\text{ }\mu\text{m}$ 增大到 $50.32\text{ }\mu\text{m}$, 振幅比从 1.04 增加到 17.11。对标定数据进行线性拟合, 线性回归系数为 0.992 6。结果表明, 研制的耦合谐振式微力传感器相对灵敏度为 $135.05 \times 10^{-6}/\mu\text{N}$, 与仿真值的偏差约为 10%, 产生偏差的原因主要是耦合谐振器装夹应力以及实验测试环境的阻尼与仿真模型设置的阻尼存在一定的偏差。

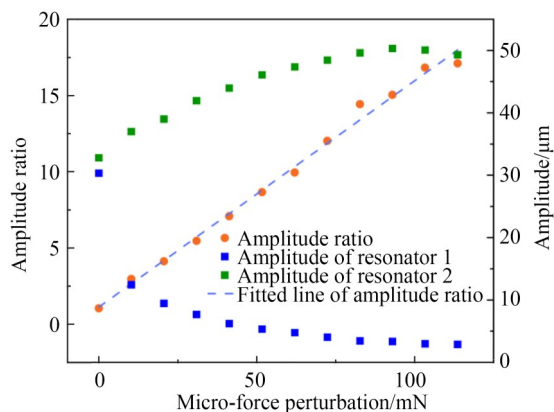


图 8 实验振幅比与微力扰动关系曲线

Fig. 8 Relationship curve between experimental amplitude ratio and micro-force perturbation

3.2.2 分辨力测试

为评估弱耦合谐振传感器的测量分辨力, 利用微动台产生等间隔纳米步进, 并检测受扰动梁的振幅变化。通过闭环控制模式驱动微动台移动, 使施加在力杠杆一端的力发生微小改变, 实时记录测振仪的振幅数据。当振幅采样率为

$12\,000\text{ Hz}$ 时, 峰峰值噪声约为 12 nm , 谐振器的分辨力测试曲线如图 9 所示。

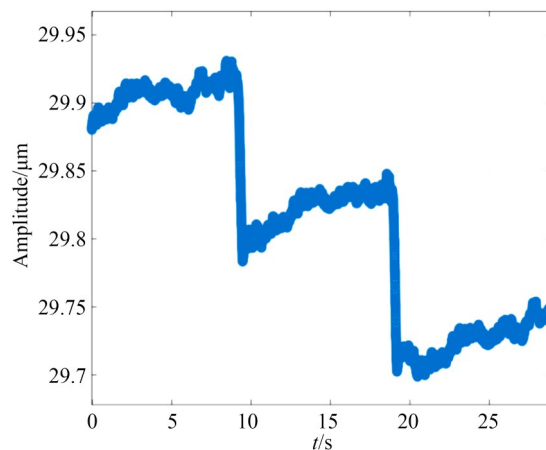


图 9 弱耦合谐振器振幅分辨力测试

Fig. 9 Amplitude resolution test of weakly coupled resonator

测试结果表明, 研制的耦合谐振式微力传感器分辨力优于 $30\text{ }\mu\text{N}$ 。由于微动台采用了闭环控制模式驱动, 对其发出位移指令后, 微动台产生相应位移并伴随过冲现象, 闭环控制模块通过回退机制补偿过冲导致的位移偏差, 最终谐振器在微力扰动作用下, 其振幅呈现先上升后趋于稳定的动态响应趋势。

3.2.3 振幅迟滞测试

考虑到耦合谐振微力传感器采用了压电陶瓷驱动, 而压电材料电致伸缩效应存在非线性和迟滞, 可能导致微力-振幅比输出曲线存在迟滞误差, 因此对研制的微力传感器进行了迟滞误差

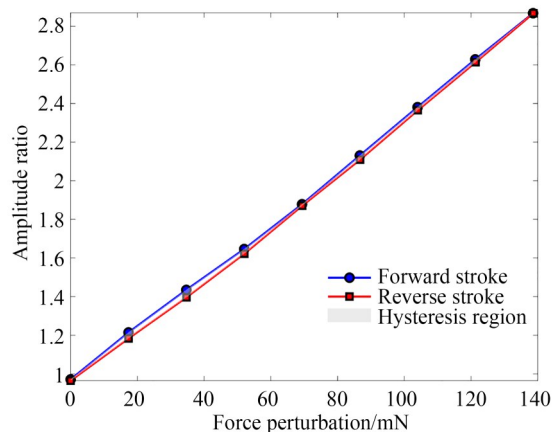


图 10 弱耦合谐振器振幅迟滞测试

Fig. 10 Amplitude hysteresis test of weakly coupled resonator

测试。实验采用逐步加载与卸载的方式对系统施加扰动微力,记录不同输入值对应的输出响应,并绘制出完整的输入-输出曲线,如图 10 所示。通过对比正行程与反行程的输出数据,可观察到迟滞现象,计算得迟滞量为 $\Delta H_{\max} = 0.0397$,迟滞误差为 1.3%FS。

将所研制的弱耦合谐振式微力传感器与近年来文献中其他原理的微力传感器的性能

指标进行了对比,如表 2 所示。结果表明,该微力传感器表现出良好的测量灵敏度和分辨力,其相对灵敏度比应变式微力传感器提高 4 600 倍,比光薄膜式微力传感器提高 125 倍;微力测量分辨力优于 30 μN ,实验结果数值偏大,其大小主要受限于微力标定装置,由于微动台处于持续的闭环反馈状态,测量振幅噪声偏大。

表 2 本文研制的弱耦合微力传感器与其他原理微力传感器的性能对比

Tab. 2 Performance comparison of developed weekly coupled micro-force sensor with those based on other principles

测力计	应用原理	量程/mN	相对灵敏度($\times 10^{-6}/\mu\text{N}$)	分辨力/ μN
文献[7]	悬臂梁式	10~220	18.83	——
文献[19]	扭丝式	0~150	78.76	26.56
文献[20]	应变片式	0~160	0.03	——
文献[21]	光薄膜	0~290	1.08	165
本文	耦合谐振式	0~120	135.05	优于 30

4 结 论

本文研制了基于模态局部化的二自由度弱耦合谐振式微力传感器,使用压电陶瓷驱动耦合谐振器,通过柔性铰链力放大杠杆结构将待测微力扰动传递至受扰动谐振器,通过测量两谐振器振幅比实现了超高灵敏度微力测量。最后,搭建了标定测试系统对研制的微力传感器进行了标定实验。结果表明,该传感器微力测量相对灵敏度为 $135.05 \times 10^{-6}/\mu\text{N}$,与同量程不同原理的微力传感器相比,其灵敏度提升显著,比应变式微力传感器的相对灵敏度提升 4 600 倍以上,微力测量分辨力优于 30 μN 。该研究表明,通过引入柔性杠杆机构将微力扰动直接作用于谐振器轴线方向的敏感方

式,可有效提升传感器测量灵敏度,验证了基于模态局部化技术的高灵敏度微力传感器结构方案的可行性,为微力测量提供了新思路。未来将采用非对称耦合谐振器结构,微力标定实验装置优化,环境干扰减小,以及外围电路补偿等措施,进一步提升传感器的线性度和分辨力等性能指标。

作者贡献声明:

王徐康:传感器设计与实验测试,论文撰写;
黄强先:测量方法与论文构思;
郭天武:实验搭建与数据分析;
程荣俊:实验方法设计及论文修改;
李红莉:测量数据分析;
张连生:论文修改。

参考文献:

[1] SHAO C Y, LIU Y M, SUN C Z, *et al.* A high-precision roundness error separation method based on time-frequency domain transformation for parameter optimization [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 74: 1000610.

[2] LIANG W, LI X Q, ZHONG S C, *et al.* Three-dimensional micro-force measurement method based on broadband optical coherence [J]. *Measurement*, 2024, 234: 114845.
[3] SEO D, RYU Y, LEE J. MEMS load cell for measuring μN level thrust of the micro-thrusters [J]. *In-*

- ternational Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2023, 24(3): 836-844.
- [4] YU W, ZHU J J, XU Y, *et al.* Optical nanofiber-enabled self-detection picobalance[J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(6): 2316-2323.
- [5] 龚攀, 杜安斌, 张飞, 等. 用于超构表面衍射光帆光力测量的扭秤设计[J]. *光电工程*, 2024, 51(8): 156-165.
- GONG P, DU A B, ZHANG F, *et al.* Torsion pendulum design for metasurface-based diffraction light sail optical force measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2024, 51(8): 156-165. (in Chinese)
- [6] SCHWERTHEIM A, AZEVEDO E R, LIU G, *et al.* Interlaboratory validation of a hanging pendulum thrust balance for electric propulsion testing[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(3): 034502.
- [7] WANG F M, LIAO C R, ZOU M Q, *et al.* Microstructured cantilever probe on optical fiber tip for microforce sensor [J]. *Photonic Sensors*, 2024, 14(2): 240204.
- [8] THAPA P, RAJ D, SARMA S. Rapid fabrication of hierarchically microstructured high-performance flexible resistive pressure sensors with laser engraving[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2025, 25(6): 9432-9440.
- [9] WANG F M, ZOU M Q, LIAO C R, *et al.* Three-dimensional printed microcantilever with mechanical metamaterial for fiber-optic microforce sensing [J]. *APL Photonics*, 2023, 8(9): 096108.
- [10] 张钊, 常洪龙. 模态局部化传感器研究进展[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(13): 32-40.
- ZHANG ZH, CHANG H L. The research progress on mode-localized sensors[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(13): 32-40. (in Chinese)
- [11] ZHANG Z, ZHANG H M, HAO Y C, *et al.* A review on MEMS silicon resonant accelerometers [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2024, 33(2): 174-208.
- [12] 肖奇军, 罗忠辉, 郭大为. 三自由度弱耦合谐振式微质量测量传感器[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(2): 297-304.
- XIAO Q J, LUO ZH H, GUO D W. Three-DoF weakly coupled resonator micro-balance for mass detection[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(2): 297-304. (in Chinese)
- [13] HUMBERT C, WALTER V, LEBLOIS T. A mass sensor based on digitally coupled and balanced quartz resonators using mode localization [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2022, 335: 113378.
- [14] 刘语斐, 彭春荣, 刘向明, 等. 一种模态局域化感应式 MEMS 电场传感器设计[J]. *仪表技术与传感器*, 2024(9): 22-27.
- LIU Y F, PENG CH R, LIU X M, *et al.* Design of charge-induced MEMS electric field sensor based on mode localization [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2024(9): 22-27. (in Chinese)
- [15] LI W M, YE F, RUAN B, *et al.* A mode-localized magnetometer with resolution of $6.9 \text{ nT}/\sqrt{\text{Hz}}$ within the range of 100 mT [C]. 2020 33rd IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2020). January 18-22, 2020, Vancouver, Canada. IEEE, 2020, 190-193.
- [16] CAI P C, XIONG X Y, WANG K F, *et al.* A novel self-temperature compensation method for mode-localized accelerometers [J]. *Micromachines*, 2022, 13(3): 437.
- [17] WANG K F, XIONG X Y, WANG Z, *et al.* A decouple-decomposition noise analysis model for closed-loop mode-localized tilt sensors[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2023, 9: 157.
- [18] THIRUVENKATANATHAN P, WOODHOUSE J, YAN J, *et al.* Limits to mode-localized sensing using micro- and nanomechanical resonator arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109(10): 104903.
- [19] WU J, LIU T G, WANG K S, *et al.* A measuring method for micro force based on MEMS planar torsional spring [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(3): 035002.
- [20] LIU M J, ZHANG Q, SHAO Y W, *et al.* Research of a novel 3D printed strain gauge type force sensor[J]. *Micromachines*, 2019, 10(1): 20.
- [21] CHEN T X, ZHU L, CHEN J, *et al.* Optical mil-

linewton force sensors based on GaN devices integrated with bionic-structured PMDS films [J].

IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70 (7): 3828-3832.

作者简介:



王徐康(2000—),男,浙江东阳人,硕士研究生,2019年于中国计量大学获得学士学位,主要从事模态局部化传感器方面的研究。E-mail: wangxukang_00@163.com

通讯作者:



程荣俊(1988—),男,湖北麻城人,副教授,硕士生导师,2016年于西安交通大学获得博士学位,主要研究方向包括微纳米测量技术与系统、微纳传感器设计、测控技术与系统等。E-mail: chengrj@hfut.edu.cn