DOI: 10.3901/JME.2020.13.032

模态局部化传感器研究进展*

张 钊 常洪龙

(西北工业大学机电学院 西安 710072)

摘要: 模态局部化现象由诺贝尔奖获得者 ANDERSON 于 1958 年发现, 对理解在紊乱固体中的电子传递过程具有重大意义, 是固态物理领域的重要发现。近些年, 模态局部化现象开始应用于传感器设计。模态局部化传感器以不同谐振器之间的幅值比作为输出量纲, 实现了超高灵敏度的测量。揭示了振幅比与振动系统结构之间的关系, 解释了如何提高模态局部化传感器的灵敏度。并通过典型的模态局部化传感器设计案例, 给出了模态局部化传感器的设计规则。

关键词: 模态局部化现象; 弱耦合谐振器; 振幅比; 传感器

中图分类号: TP212

The Research Progress on Mode-localized Sensors

ZHANG Zhao CHANG Honglong

(School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Mode localization phenomenon is proposed by Nobel Prize winner ANDERSON in 1958, which has a great impact on the understanding of the electron conduction processes in disordered solids, and it is an important discovery in the field of solid state physics. In recent years, the phenomenon of mode localization has been applied to design of sensors. The mode-localized sensors take the amplitude ratios between different resonators as the output metric and realize the ultra-high sensitivity. the relationship between amplitude ratio and system structure parameters and explains are revealed how to improve the sensitivity of mode localization sensors. The design rules of mode-localized sensors are given by several examples of mode-localized sensors.

Key word: mode-localization phenomenon; weakly coupled resonators; amplitude ratios; sensors

0 前言

模态局部化现象是由 ANDERSON 于 1958 年在固态物理领域发现^[1], 解释了在诸多紊乱系统中的电子传递特性。ANDERSON 凭借这一发现荣获 1977 年诺贝尔物理学奖, 因此模态局部化现象也被称为安德森局部化。后来, 模态局部化现象在光学、声学 and 力学等领域均有各自的表现形式。典型地, 模态局部化现象可被用来解释叶轮机械中叶片不可预测的疲劳破坏^[2]。

HODGES 和 WOODHOUSE 以钟摆模型为例, 进一步解释了周期振动系统在受到扰动后的模态局部化现象^[3]。在理想情况下多个相同的钟摆通过弹簧耦合做等幅振动, 但当钟摆受到外界扰动或者实

际结构参数有所偏差不能保证各钟摆完全相同时, 会导致等幅振动的钟摆发生能量集中效应, 即在驱动点附近的钟摆以大振幅振动, 而远离驱动点的钟摆仅以非常小的振幅振动, 此时钟摆系统就发生了模态局部化现象。

类似地, 人们可以基于弱耦合的微机械谐振器, 进而设计高灵敏度的模态局部化传感器。在结构上, 传感器以谐振器为振动单元, 各谐振器结构参数完全相同, 其间通过机械梁或静电的方式耦合^[8], 等效耦合刚度远远小于各谐振器的有效刚度。由于结构完全相同, 整个系统受到外力驱动时, 各谐振器以相同振幅振动。外界扰动输入后, 模态局部化现象发生, 各谐振器的振幅发生变化, 通过测量谐振器之间的振幅比的变化即可获得外界物理量的变化。

本文将通过理论分析来揭示弱耦合谐振系统内部振幅变化的规律, 给出模态局部化传感器的设计准则以及研究现状。

* 国家重点研发计划(2018YFB2002600)、国家自然科学基金(51575454)和陕西省重点研发计划(2019ZDLGY02-06)资助项目。20191010 收到初稿, 20200118 收到修改稿

1 弱耦合谐振器及其模态局部化

1.1 弱耦合谐振器的结构设计及能量局部化

微机械谐振器可以用质量-弹簧-阻尼二阶系统来表示, 其主要参数包括有效质量 m 、有效刚度 k 和阻尼 c , 其固有频率 ω_0 为

$$\omega_0^2 = k / m \quad (1)$$

引入振动系统的外界扰动会改变内部谐振器的有效参数, 从而引起固有频率的变化。当系统受到简谐驱动力作用时, 各谐振器均会按照一定的振幅做简谐振动, 驱动力频率与固有频率相同或接近的谐振器处在共振状态, 以最大振幅振动。固有频率远离该驱动力频率的谐振器则做小幅振动。从整体上看, 在驱动力作用下, 各个按照不同振幅振动的谐振器形成了特定的振动形态, 被称为主振型, 也被称为模态^[10]。模态仅与各谐振器的有效参数有关。当各个谐振器物理参数各不相同, 系统具有多个不同的固有频率, 即存在多个不同的模态。此时各谐振器的振幅在初始的驱动状态下有很大差别, 很难选择一个合适的振型作为参考来敏感外界特定物理量的变化。为此我们通过结构设计, 使振动系统存在适当的模态作为检测外界变化的参考。模态局部化传感器具有多种结构形式, 比如悬臂梁结构^[11]、环形结构^[12]和双端固定音叉结构^[13]等。

图 1 采用了双端固定音叉结构, 各个谐振器的有效参数相同, 并且完全对称。由于各个谐振器的固有频率相同, 则同样的驱动频率可以使所有的谐振器处在相同的振动状态。参数相同并且结构对称的多自由度振动系统具有多个接近的固有频率, 所以当驱动频率接近或等于振动系统的固有频率时, 谐振器都处在共振状态, 振幅几乎相同, 它们将在同一模态

图 1 双端固定音叉结构弱耦合谐振器结构简图

下等幅振动, 因此振动系统具有多个相同的振动模态。多自由度耦合谐振器的等幅振动如图 2 所示。

图 2 谐振器等幅振动模型

当系统中某个谐振器受到外界扰动时, 其有效参数改变, 因此其固有频率发生变化。在驱动频率不变的情况下, 受扰动谐振器的固有频率将远离驱动频率, 脱离共振状态, 振幅减小。假设能量输入功率不变, 受扰动谐振器振幅减小, 则未受扰动且处于共振状态下的谐振器将会以更大振幅振动, 如图 3 所示。

图 3 受扰动谐振器振幅变化

振动系统在扰动发生前后, 不仅各个谐振器从等幅振动到受扰动后的幅值发生变化, 整个振动系统也从同一模态到局部化到其中部分谐振器上, 这就是弱耦合谐振器的模态局部化现象。在这过程之中, 能量在整个振动系统从均匀分布到聚集在某一谐振器上, 并最终表现在各个谐振器的振幅上, 这一现象我们称之为能量局部化。由此可知, 模态局部化现象的发生必然伴随着能量局部化, 能量局部化是模态局部化现象的重要特征之一。

运用参数相同且结构对称的振动系统, 由于引入扰动前各谐振器处于同一模态下做等幅振动, 谐振器的幅值比为 1, 可作为参考模态。引入扰动之

后, 谐振器的幅值比将随着扰动变化。因此利用模态局部化现象, 以未受扰动时的系统幅值比为参照, 振幅比作为输出量纲的振动系统可以用来敏感外界特定物理量的变化, 从而得到极高的灵敏度。

1.2 模态局部化传感器的输出量纲

模态局部化传感器可采用多种输出量纲, 研究表明以幅值比为输出量纲的传感器可得到最优的测量结果^[14]。现阶段基于模态局部化现象的弱耦合谐振器多采用双端音叉固定结构, 谐振器之间通过机械梁或者静电方法耦合。为简化分析过程与方便理论计算, 以二自由度为例, 弱耦合谐振器振动系统可简化为一个质量-弹簧-阻尼系统, 如图4所示。

图4 弱耦合谐振器物理模型

其中两个谐振器的有效质量分别为 m_1, m_2 , 有效刚度分别为 k_1, k_2 , 阻尼系数分别为 c_1, c_2 , 两谐振器之间有效耦合刚度为 k_c 。弱耦合是指有效耦合刚度 k_c 远远小于各谐振器的有效刚度, 即: $k_c \ll k_1, k_2$ 。两谐振器仅在 x 方向上同向或反向振动, 位移分别为 x_1, x_2 。此二自由度系统的运动微分方程组为

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + c \dot{x}_1 + k_1 x_1 = k_c (x_2 - x_1) + f \\ m_2 \ddot{x}_2 + c \dot{x}_2 + k_2 x_2 = k_c (x_1 - x_2) + f \end{cases} \quad (2)$$

其中两谐振器处在同一环境下振动, 因此阻尼系数可取 $c_1 = c_2 = c$, f 为驱动力可取 $f = F \sin \omega t$, ω 为驱动频率。假设振动系统处在真空环境下, 阻尼的影响十分微弱, 为计算简便, 可忽略阻尼项。设(1)的一个特解为^[10]

$$x = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

A_1, A_2 分别为两谐振器的幅值, φ 为谐振器与驱动力的相位差。当 $f = 0$ 时, 系统做自由振动, 将(2)式代入(1)式可解得此二自由度振动系统的固有频率

$$\begin{cases} \omega_1 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2 + k_c}{m_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_c}{m_1} + \frac{k_2 + k_c}{m_2} \right)^2 + 4 \frac{k_c^2}{m_1 m_2}} \right] \\ \omega_2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2 + k_c}{m_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_c}{m_1} + \frac{k_2 + k_c}{m_2} \right)^2 + 4 \frac{k_c^2}{m_1 m_2}} \right] \end{cases} \quad (4)$$

ω_1 是两频率中较低的频率, 称之为第一阶固有频率, 简称基频; ω_2 称为第二阶固有频率^[10]。他们

均只与系统的有效参数有关。将式(2)、(3)代入式(1)可得不同固有频率下两谐振器之间的幅值比

$$\begin{cases} AR_1 = \frac{A_{21}}{A_{11}} = \frac{-m_1 \omega_1^2 + k_1 + k_c}{k_c} \\ AR_2 = \frac{A_{22}}{A_{12}} = \frac{k_c}{-m_2 \omega_2^2 + k_2 + k_c} \end{cases} \quad (5)$$

假设两谐振器参数完全相同, 即取 $m_1 = m_2 = m$, $k_1 = k_2 = k$ 。此时两谐振器在不同的固有频率之下的幅值比均为 1, 即

$$AR_1 = AR_2 = 1 \quad (6)$$

振动系统在引入扰动前幅值比为 1, 计算结果与仿真结果一致。由图2和式(5)可得此二自由度弱耦合系统可作为敏感外界扰动的一个参考模态。

当系统受到外界扰动时, 谐振器的有效参数发生改变。根据不同的环境, 扰动可等效为谐振器的有效质量变化或有效刚度变化。假设外界扰动对谐振器2的有效刚度产生了 Δk 的影响, 振动系统的质量-弹簧-阻尼模型如图5所示。

图5 受扰动弱耦合谐振器物理模型

此时二自由度系统的运动微分方程组为

$$\begin{cases} m \ddot{x}_1 + c \dot{x}_1 + k x_1 = k_c (x_2 - x_1) + f \\ m \ddot{x}_2 + c \dot{x}_2 + (k + \Delta k) x_2 = k_c (x_1 - x_2) \end{cases} \quad (7)$$

由(6)式可得振动系统的幅值比为

$$AR_i \approx \frac{1 + \kappa + \varepsilon - \omega_{Ri}^2}{\kappa} \quad (8)$$

式中, $\kappa = k_c / k$ 为有效耦合刚度与谐振器有效刚度之比, 称为耦合系数; $\varepsilon = \Delta k / k$ 为刚度扰动与谐振器有效刚度之比; $\omega_{Ri} = \omega_i / \omega_0$ 为驱动频率与谐振器的固有频率之比。当以系统第一阶或第二阶固有频率驱动时, 即 $\omega_{R1}^2 = 1$ 或 $\omega_{R2}^2 = 1 + 2\kappa$, 可得两谐振器在不同扰动下的幅值比变化情况, 如图6所示。

由图6可知, 当系统未受扰动时, 两谐振器的幅值比为 1; 当系统受到外界扰动, 两谐振器的幅值比发生变化。根据式(8)以及图6可知, 在不同固有频率驱动时, 正刚度扰动与负刚度扰动产生的幅值比不同。对于正刚度扰动, 第一阶固有频率处驱动相对于第二阶固有频率处驱动可获得更大的幅值比输出; 对于负刚度扰动, 第二阶固有频率处驱动相对于第一阶固有频率处驱动可获得更大的幅值比输出。

图 6 引入扰动谐振器幅值比

1.3 模态局部化传感器高灵敏度的理论解释

在弱耦合谐振器中, 耦合系数 κ 与代表扰动程度的 ε 是最重要的两个参数。有效耦合刚度以及扰动的大小会对两耦合谐振器发生模态局部化现象的程度产生影响^[3]。有效耦合刚度较大时, 当其中一个谐振器受到微弱的刚度扰动, 由于两谐振器之间的刚度平衡效应, 即耦合越强, 谐振器之间越容易相互影响从而使外界扰动相对某一谐振器的刚度扰动减弱; 有效耦合刚度越弱, 两谐振器受到彼此间的刚度干扰越弱, 刚度越不容易平衡。

当耦合刚度较大时, 受扰动谐振器因刚度平衡效应使得自身刚度变化小于外界加载在谐振器上的扰动, 从而使固有频率变化减小, 因此振幅变化减小, 更难从原来模态脱离出来。保持扰动不变, 假设耦合部分的耦合刚度趋近于零, 理论上两谐振器之间仅有连接, 互相之间没有刚度影响。其中一个谐振器受到刚度扰动后, 不会受到串联谐振器的刚度影响, 自身刚度变化增大, 谐振频率变化增大, 因此振幅减小更为明显, 更容易从原来的模态脱离, 模态局部化现象更为明显。因此相对扰动系数 ε 与耦合梁刚度系数 κ 比值越大, 则更容易发生模态局部化现象, 得到更大的幅值比, 如图 7 所示。

图 7 谐振器幅值比与 ε/κ_i 的关系

由图 7 可知, 相对扰动系数 ε 与耦合梁刚度系数 κ 比值越大, 同一振动系统的幅值比相差可接近一倍。因此在外界扰动不变的情况下, 通过结构设计使得两谐振器之间耦合刚度减小, 是增强模态局部化现象, 提高弱耦合谐振式传感器灵敏度的重要方法。

2 模态局部化传感器设计

模态局部化传感器可应用于多种物理参数的测量, 包括加速度、电压、磁场和电场等。模态局部化传感器的核心是弱耦合谐振系统, 单个谐振器多采用双端音叉固定结构^[15], 谐振器之间采用机械梁或静电耦合连接, 实现弱耦合, 外界物理量的变化会反映在振动系统内部谐振器幅值比的变化。因此, 根据不同的目标参数设计合理前端敏感结构, 并且根据各物理量的特定设计合理的谐振器结构是模态局部化传感器设计的关键。

2.1 加速度传感器

模态局部化加速度传感器为了将外界加速度变化敏感到弱耦合谐振器上, 在结构设计方面采用了两个质量块, 如图 8 所示。

(a) 加速度传感器结构简图

(b) 二自由度模态局部化加速度传感器扫描电镜图

图 8 弱耦合谐振式加速度传感器

两质量块分别与谐振器构成一个平板电容器从而形成静电负刚度。内部的弱耦合谐振器采用了双端音叉固定结构,两谐振器之间用桥式耦合梁耦合,由梳齿电容驱动。初始条件下,两谐振器等幅振动。当外界加速度作用在质量块上时,质量块与谐振器间的距离发生变化,导致静电负刚度变化,对谐振器产生刚度扰动,从而产生模态局部化现象,导致两谐振器间的幅值比发生变化,通过幅值比的变化可以得到加速度的大小。

西北工业大学设计了国际上第一个模态局部化加速度传感器^[16]。其以幅值比为输出量纲敏感外界加速度变化,传统的振动传感器以频率为输出量纲敏感外界变化。对于同样大小的加速度变化,模态局部化传感器的幅值比变化量比传统的谐振器的频率变化量高出了 302 倍^[16],灵敏度大大提高,如图 9 所示。

图9 谐振器幅值比与频率变化比较

剑桥大学 SESHIA 教授团队于 2018 年通过改进前端质量块结构,使加速度传感器灵敏度达到 $1.007/g$,零偏稳定性达到 $7 \mu g$ ^[18]。

通过增加自由度可进一步提高传感器的灵敏度。西北工业大学设计的三自由度弱耦合谐振式加速度传感器结构如图 11 所示。谐振器在结构设计上采用双端固定音叉结构,但仅有外部两个谐振器的参数完全相同,而中间谐振器则采用大刚度设计,

(a) 二自由度加速度计结构简图

(b) 加速度计灵敏度

图 10 二自由度加速度传感器

(a) 三自由度加速度传感器结构简图

(b) 三自由度加速度传感器扫描电镜图

图 11 三自由度弱耦合谐振式加速度传感器

其刚度至少为外部谐振器的 2 倍以上。在以振动系统第一阶固有频率驱动时,外部两谐振器做等幅振动,中间谐振器几乎不振动;系统受扰动后,外部谐振器的幅值比变化,在加速度相同的情况下,其幅值比变化量比二自由度加速度传感器提高了 3.48

倍^[19]。从结构上考虑, 不论扰动前还是扰动后, 位于中间的大刚度谐振器均没有明显的振幅变化, 但最终的幅值比却有了显著增加。这是因为从效果上看, 中间大刚度谐振器的存在减小了外部两谐振器之间的耦合刚度, 因此在相同扰动的情況下, 幅值比增大。

四自由度的弱耦合谐振式加速度传感器已证明可比三自由度加速度传感器在灵敏度上提高 8.38 倍, 分辨率提高 9.35 倍^[20]。四自由度弱耦合谐振式加速度传感器结构及扫描电镜分别如图 12 所示。

(a) 四自由度加速度传感器结构简图

(b) 四自由度加速度传感器扫描电镜图

图 12 四自由度弱耦合谐振式加速度传感器

2.2 电压传感器

模态局部化传感器还可以用于电压的测量。待测电压可直接作用在平板电容上, 将被测电压值转化为弱耦合谐振器的振幅变化, 其传感核心是可以引入刚度干扰的耦合电容, 如图 13a 所示^[21]。

两个输入电极和谐振器构成了平板电容器, 将其设计为梳齿阵列的方式可以极大的提高引入谐振器的刚度干扰。电压传感器内部包含三个谐振器, 通过桥式机械耦合梁耦合, 由梳齿电容静电驱动, 其振动信息通过电容检测的方式来测量。在谐振器

(a) 电压传感器结构简图

(b) 输入电极与谐振器间的静电力

图 13 弱耦合谐振式电压传感器

工作状态下, 两个外侧谐振器等幅振动, 当被测电压施加于检测电极上时, 检测电极与谐振器之间形成静电力, 变化的静电力会在谐振器上产生静电负刚度, 对谐振器产生刚度扰动, 导致谐振器的工作状态发生变化, 通过检测谐振器的振幅比, 即可得到外界电压的信息。输入电极与谐振器之间产生的静电力如图 13b 所示。

测试结果表明基于模态局部化的三自由度弱耦合谐振式电压传感器分辨率可达到 $46.8 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ ^[21], 证明基于模态局部化的电压传感器可以为高精度的电压测量提供新方法。

2.3 磁场传感器

磁场测量主要基于霍尔效应进行检测^[22]。然而对于 MEMS 领域, 基于洛伦兹力设计的磁传感器更为常见^[23]。基于模态局部化的弱耦合谐振式磁场传感器, 采用洛伦兹力发生结构, 敏感 Z 轴方向磁场强度的变化, 两端各放置一个用于通过直流电流的格栅结构。结构设计如图 14a 所示。

两端的格栅结构分别通过平板电容与中间的谐振器耦合在一起, 当传感器被放置在磁场当中时, 一端的格栅结构可以作为调节电极调节谐振器的初始振动状态。与此同时, 在另一端的格栅结构上施加直流电流, 在洛伦兹力作用下格栅结构发生形变, 使得与之相连的平板电容产生水平方向的位移, 从

(a) 磁场传感器结构简图

(b) 磁场传感器扫描电镜图

图 14 弱耦合谐振式磁场传感器

而对中间的弱耦合谐振器产生刚度扰动，由此敏感外界磁场强度的大小。

经试验测试可得，其幅值比变化量是频率变化量的 7 800 倍，其分辨率最佳可达到 $1.6 \mu\text{T}/\text{Hz}^{[24]}$ 。通过进一步优化结构，其分辨率有望得到进一步的提高。

2.4 电场传感器

为了检测电场强度，在过去的 50 年间已发展出了多种电场传感器^[25]。西北工业大学研制了第一款模态局部化直流电场强度传感器^[30]。

不同于检测电势差的方式测量电场强度，模态局部化直流电场传感器可以直接处于电场中敏感检测。通过电容极板间电势差产生的静电力，将电场强度输入到谐振器上。电场传感器的结构简图如图 15 所示。

(a) 电场传感器结构简图

(b) 电场传感器扫描电镜图

图 15 弱耦合谐振式电场传感器

试验数据表明其灵敏度可以达到 0.08 V/m ，是当前精度最高的电场传感器之一^[30]。

3 结论

本文通过弱耦合振动系统模型从理论上解释了在振动力学领域的模态局部化现象。并得到如下结论：模态局部化现象的剧烈程度取决于扰动与两谐振器之间的耦合部分有效刚度的比值，即 ε/κ 。该比值越大，模态局部化效应越强烈，对同样扰动输出的幅值比更大；耦合部分是弱耦合谐振器设计的重点，因为其刚度大小对两谐振器敏感外界扰动起着至关重要的作用。

本文从概念上分析了在谐振频率处谐振器处于共振状态使处在这一状态的振动单元幅值达到峰值，实际上由于耦合的存在，系统在谐振频率附近即会达到共振，并且存在一个频率带，当驱动频率在这一频率带内，两谐振器均会发生共振现象。扰动只有足够大才能使得谐振器固有频率超出频带范围，脱离共振状态，发生模态局部化现象。最后，通过多场景传感器设计案例说明模态局部化传感器具有高精度的潜力，有望为传感器应用带来新的突破。

模态局部化传感器的研究仅是刚刚开始，还有很多问题有待进一步研究。譬如，在理论研究方面，发生模态局部化现象的同时伴随的能量局部化现象，目前仅能定性的得出振动系统的能量在谐振器之间发生转移，定量描述还受制于振动系统的阻尼效应以及振幅稳定性等问题而无法得出一个清晰的结论。在实际应用方面，如何与实际的应用场景结合设计出更好的前端敏感结构将是重要的研究方向之一。

参 考 文 献

- [1] ANDERSON P W. Absence of diffusion in certain random lattices[J]. Physical Review, 1958, 109(5): 1492-1505.
- [2] KIM D, LEE I. A study on mode localization phenomena: influences of the stiffness and the mass of the coupler on mode localization[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 216(1): 53-73.
- [3] HODGES C H. Confinement of vibration by structural irregularity[J]. Journal of Sound and Vibration, 1982, 82(3): 411-424.
- [4] HODGES C H, WOODHOUSE J. Confinement of vibration by one-dimensional disorder, I: Theory of ensemble averaging[J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 130(2): 237-251.
- [5] HODGES C H, WOODHOUSE J. Confinement of vibration by one-dimensional disorder, II: A numerical experiment on different ensemble averages[J]. Journal of Sound and Vibration, 1989, 130(2): 253-268.
- [6] HODGES C H, WOODHOUSE J. Theories of noise and vibration transmission in complex structures[J]. Rep. Prog. Phys., 1986: 49-107.
- [7] HODGES C H, WOODHOUSE J. Vibration isolation from irregularity in a nearly periodic structure: Theory and measurements[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1983, 74(3): 894-905.
- [8] SIAVASH P, FARROKH A. Electrically coupled MEMS bandpass filters part I: With coupling element[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 122: 307-316.
- [9] SIAVASH P, FARROKH A. Electrically coupled MEMS bandpass filters part II: With coupling element[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 122: 317-325.
- [10] 谢官模. 振动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [11] XIE Guanmo. Vibration mechanics[M]. Beijing: National Defense University, 2011.
- [12] SPLETZER M, RAMANA A, WU A Q, et al. Ultrasensitive mass sensing using mode localization in coupled microcantilevers[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(25): 254102-254102-3.
- [13] THIRUVENKATANATHAN P, YAN J, WOODHOUSE J, et al. Ultrasensitive modelocalized mass sensor with electrically tunable parametric sensitivity[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(8): 081913.
- [14] THIRUVENKATANATHAN P, SESHIA A A. Mode-localized displacement sensing[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(5): 1016-1018.
- [15] ZHAO Chun, WOOD G S, XIE Jianbing, et al. A comparative study of output metrics for a MEMS resonant sensor consisting of three weakly coupled resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(4): 626-636.
- [16] ROESSIG T A, HOWE R T, PISANO A P, et al. Surface-micromachined resonant accelerometer[C]// International Conference on Solid State Sensors and Actuators, TRANSDUCERS'97, 1997: 859-862.
- [17] ZHANG Hemin, YUAN Weizheng, LI Boyang, et al. A novel resonant accelerometer based on mode localization of weakly coupled resonators[C]. Transducers 2015, Anchorage, Alaska, USA, June 21-25, 2015.
- [18] ZHANG Hemin, YUAN Weizheng, LI Boyang, et al. An acceleration sensing method based on mode localization of weakly coupled resonators[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2016, 25(2): 286-296.
- [19] PANDIT M, ZHAO Chun, SOBREVIELA G, et al. A mode-localized MEMS accelerometer with $7\mu\text{g}$ bias stability[C]// Micro Electro Mechanical Systems, 2018: 968-971.
- [20] KANG Hao, YANG Jing, CHANG Honglong. A closed-loop accelerometer based on three degree-of-freedom weakly coupled resonator with self-elimination of feedthrough signal[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(10): 3960-3967.
- [21] KANG Hao, YANG Jing, CHANG Honglong. A mode-localized accelerometer based on four degree-of-freedom weakly coupled resonators[C]// 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Belfast, 2018, 960-963.
- [22] LIANG Jiaju, HAO Yongcun, KANG Hao, et al. A mode-localized voltmeter with resolution of 46.8 nanovolts[C]// TRANSDUCERS, 2019: 226-229.
- [23] LENZ J, EDELSTEIN S. Magnetic sensors and their applications[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(3): 631-649.
- [24] PALA S, ÇİÇEK M, AZGIN K. A Lorentz force MEMS magnetometer[C]// 2016 IEEE Sensors, Orlando, FL, 2016: 1-3.
- [25] YAN Zimu, HAO Yongcun, LI Wenmu, et al. A mode-localized lorentz force magnetometer with $1.6\mu\text{T}/\sqrt{\text{Hz}}$ Resolution, 2019 20th International Conference on Solid-

- State Sensors[C]// Actuators and Microsystems & Euro-sensors, Berlin, Germany, 2019: 1815-1818.
- [25] YANG Pengfei, CHEN Bo, WEN Xiaolong, et al. A novel MEMS chip-based atmospheric electric field sensor for lightning hazard warning applications[C]// 2015 IEEE SENSORS, Busan, Korea, 2015: 1-4.
- [26] KAINZ A, STEINER H, SCHALKO J, et al. Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor[J]. Nature Electronics, 2018, 1(1): 68-73.
- [27] MARK N, HORENSTEIN, PATRICK R S. A micro-aperture electrostatic field mill based on MEMS technology[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 51-52: 515-521.
- [28] PENG Chunrong, YANG Pengfei, ZHANG Haiyan, et al. Design of a novel closed-loop SOI MEMS resonant electrostatic field sensor[J]. Procedia Engineering, 2010, 5(5): 1482-1485.
- [29] BERTHELIER J, GODEFROY M, LEBLANC F, et al. ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. Planetary & Space Science, 2006, 54(5): 456-471.
- [30] YAN Zimu, LIANG Jiaju, HAO Yongcun, et al. A micro resonant DC electric field sensor based on mode localization phenomenon[C]// MEMS 2019, Seoul, KOREA, 27 - 31 January, 2019.
-
- 作者简介: 张钊, 男, 1996 年出生, 博士研究生。主要研究方向为微机械谐振式传感器。
E-mail: zhang_zhao@mail.nwpu.edu.cn
常洪龙(通信作者), 男, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为微机电系统技术及应用。
E-mail: changhl@nwpu.edu.cn