

文章编号 1004-924X(2017)03-0656-07

# 基于构型优化的高阶模态微质量传感器灵敏度提升方法

赵 剑, 张淑敏, 高仁璟\*

(大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**高灵敏度是微质量传感器准确探测细菌、病毒和气体等物质的关键指标。虽然借助微型化的高阶模态梁振动可以有效提升探测灵敏度,但微尺度效应也降低了传感器的抗环境干扰能力。因此,如何在特定尺度约束下提升高阶模态传感器的灵敏度已成为谐振式微传感器设计的前沿问题。本文在研究弹性梁几何构型、压电层尺寸与有效质量分布对振动模态影响关系的基础上,建立了压电驱动多阶梯梁式微质量传感器的灵敏度分析模型,以传感器灵敏度提升最大为目标,建立了高阶振动模态下悬臂梁几何构型优化设计模型,得到了在不同振动模态下具有最高灵敏度的悬臂梁构型,使同尺寸传感器的灵敏度提升了 10.0~15.0 倍。考虑驱动位置与制造成本约束,设计并研制了具有六阶梯梁结构的高阶模态微质量传感器。实验结果表明,总长度为 17.6 mm 的六阶梯梁微质量传感器的灵敏度为  $18.8 \times 10^4$  Hz/g,考虑制造误差的影响,其二阶模态灵敏度为同尺寸等截面梁传感器的 10.0 倍,较一阶模态同尺寸传感器灵敏度提升了 19.8 倍,从而验证了所提出的高阶模态微质量传感器灵敏度提升方法的有效性和可行性。

**关键词:**微质量传感器;高阶模态;灵敏度;谐振;构型优化

**中图分类号:**TH701 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172503.0656

## Structure optimization based sensitivity improving method for high order mode multi-stepped cantilever mass sensor

ZHAO Jian, ZHANG Shu-min, GAO Ren-jing\*

(State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,  
School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

\* Corresponding author, E-mail: renjing@dlut.edu.cn

**Abstract:** High sensitivity serves as the key indicator for micro-mass sensor to accurately detect substances such as bacteria, virus and gases etc. In spite of the fact that the detection sensitivity can be improved by vibration of miniaturized high order mode micro-cantilever, the micro-size effect, at the same time, lowers anti-jamming capability of the sensor. Hence, how to improve the sensitivity of high-order mode sensor under special size constraint has been leading edge problem for sensor design. In this paper, based on the impacts of cantilever configuration, piezoelectric layer size and effective mass distribution on the vibration mode, a sensitivity analysis mode for piezoelectric driving multi-stepped micro-mass sensor was established; and, with sensor sensitivity improvement as the goal, a optimization design model for cantilever configuration in high-order mode was created, thus obtaining

收稿日期:2016-10-11;修订日期:2016-11-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51575088, No. 11372063, No. 11332004, No. 11572073);大连理工大学星海优青资助项目

a cantilever structure with the highest sensitivity in different vibration modes, which helped achieve a sensitivity improvement of 10.0~15.0 times in sensor of different sizes. Considering the constraint of driving position and manufacturing cost, a high-order mode micro-mass sensor with six-step cantilever structure was designed and developed. The results show that sensitivity of the micro-mass sensor with six-step cantilever structure (overall length: 17.6 mm) is  $18.8 \times 10^4$  Hz/g. Taking the impact of manufacturing error into consideration, its sensitivity under second-order mode is 10.0 times higher than that of the sensor with cantilever structure of the same size and cross section, with an improvement of 19.8 times compared with sensor of the same size under first-order mode. In this way, effectiveness and feasibility of the method for sensitivity improvement of high-order mode micro-mass sensor are verified.

**Key words:** micro mass sensor; higher-order mode; sensitivity; resonance; structural optimization

## 1 引言

压电悬臂梁式微质量传感器是由压电薄膜和弹性元件组成的集激励、传感于一体的新型传感器,通过探测区吸附质量前后谐振频率变化对待测物进行定性和定量分析,具有结构简单、成本低、测量精度高等优点,被广泛应用于化学、生物医学、微生物检测与识别等领域<sup>[1-5]</sup>。

灵敏度是衡量压电式微质量传感器性能的主要指标之一。除了通过改变传感器材料及尺寸微型化的方法提高灵敏度之外,研究人员在传感器截面形状、结构构型以及振动模态等方面做了大量研究。Ansari 等<sup>[6]</sup>分析比较了矩形和梯形截面悬臂梁的挠度和振动特性,结果表明其相较于矩形梁,梯形截面梁具有更好的挠度和振动特性,更适宜用于弹性敏感元件。高仁璟等<sup>[7]</sup>通过改变悬臂梁的有效刚度和有效质量分布状态,提出一种对称槽型梁结构作为弹性元件来提升传感器的探测灵敏度。Shen 等<sup>[8]</sup>研究了具有非压电延伸层的质量传感器,灵敏度相较于等长度传感器提升了 36%。Yi 等<sup>[9]</sup>研究了悬臂梁长度、宽度以及振动模态对压电传感器灵敏度的影响,指出采用高阶模态微小悬臂梁结构是提高压电谐振式传感器灵敏度的有效方法。Liao 等<sup>[10]</sup>研究了高阶模态下,矩形截面悬臂梁传感器在液体环境中的灵敏度提升情况,结果表明,相同外形尺寸下五阶模态微传感器的灵敏度为一阶模态的 94 倍。Lochon 等<sup>[11]</sup>指出,通过尺寸微型化来增大传感器谐振频率的方法受到挠度测量原理的限制,并验证了通过高阶模态提高传感器谐振频率和灵敏度的可行性。Ghatkesar 等<sup>[12]</sup>提出的高阶模态等

截面微纳米悬臂梁式微质量传感器,获得了更高的品质因数和灵敏度。但高阶模态纳米器件的测试环境要求较为苛刻,极易受外界干扰而影响测试精度<sup>[13-14]</sup>。现有研究主要集中于采用高阶振动模态来提升传感器的灵敏度,忽略了悬臂梁构型对振动模态和灵敏度的影响关系。因此,为了解决灵敏度与工程实用性之间的矛盾,需要深入研究悬臂梁局部结构的刚度和质量分布状态对探测灵敏度的影响关系,因而获得特定尺寸下高阶模态传感器的最优构型。

为此,本文在保证外形尺寸不变的基础上,借助结构优化技术,以高阶模态传感器灵敏度提升为优化目标,提出了高阶模态微质量传感器悬臂梁构型优化设计模型,得到了不同振动模态下具有最高灵敏度的传感器最优构型,较同尺寸同阶模态下等截面悬臂梁传感器的灵敏度提升了 10.0~15.0 倍,并研制了二阶模态下具有最高灵敏度的六阶梯梁式微质量传感器,总长度为 17.6 mm 的微质量传感器灵敏度可达到  $18.8 \times 10^4$  Hz/g。考虑制造误差和黏接的影响,较同尺寸二阶模态传感器的灵敏度提升了 10 倍,验证了所提出的高阶模态微质量传感器灵敏度提升方法的有效性。

## 2 多阶梯悬臂梁结构设计

压电谐振式微质量传感器由压电层与弹性层组成,如图 1 所示,根据悬臂梁吸附质量前后的谐振频率差推算出微质量,即  $\Delta m = -\Delta f M_{ne} / f_n$ ,其中  $f_n$  为对应第  $n$  阶模态的结构谐振频率,  $M_{ne}$  为悬臂梁有效质量,  $\Delta m$  为被测物质量,  $\Delta f$  为谐振频率变化量。

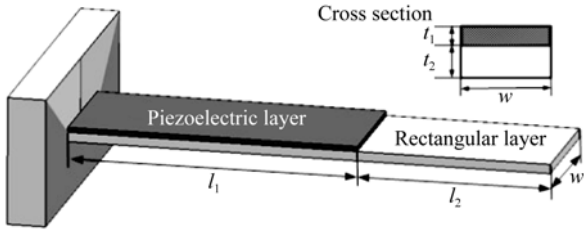


图 1 等截面悬臂梁式传感器结构  
Fig. 1 Uniform cross-section cantilever sensor

传感器探测灵敏度与悬臂梁结构的谐振频率和有效质量密切相关。因此,在保证结构轮廓尺寸不变的基础上,改变悬臂梁的有效刚度与质量分布状态可以有效提升结构谐振频率和传感器的质量探测灵敏度。提出了一种新型的多阶梯变厚度悬臂梁式微质量传感器结构,如图 2 所示,通过优化设计各阶梯的厚度及其分布来提升传感器的探测灵敏度。为此,沿悬臂梁长度方向均分成  $n$  等份,产生  $n+1$  个截面,将各阶梯梁的厚度  $t_i$  设为设计变量 ( $t_1, t_2, \dots, t_n$ )。

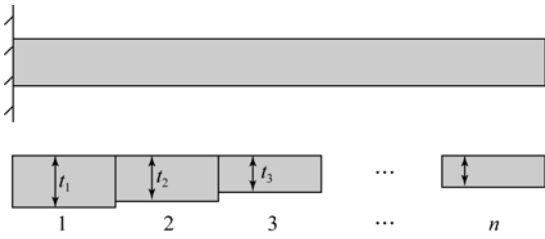


图 2 矩形截面悬臂梁沿长度方向  $n$  等分  
Fig. 2 Rectangular cross-section cantilever with  $n$  equal length segments and variable thickness

假设弹性层与压电层黏合,则第  $i$  阶梯梁的

$$\begin{cases} h_i(x) = c_{i,1} \sin(k_i x) + c_{i,2} \cos(k_i x) + c_{i,3} \sinh(k_i x) + c_{i,4} \cosh(k_i x) \\ h_{i+1}(x) = c_{i+1,1} \sin(k_{i+1} x) + c_{i+1,2} \cos(k_{i+1} x) + c_{i+1,3} \sinh(k_{i+1} x) + c_{i+1,4} \cosh(k_{i+1} x) \end{cases} \quad (5)$$

得到第  $i$  个截面变换处的一致性条件:

$$\begin{cases} h_i(x_i) = h_{i+1}(x_i) \\ h'_i(x_i) = h'_{i+1}(x_i) \\ h''_i(x_i) = \lambda_i h''_{i+1}(x_i) \\ h'''_i(x_i) = \lambda_i h'''_{i+1}(x_i) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\lambda_i = D_{i+1}/D_i$ 。

$$\begin{cases} [C_{i+1,1} \ C_{i+1,2} \ C_{i+1,3} \ C_{i+1,4}]^T = T^{(i)} [C_{i,1} \ C_{i,2} \ C_{i,3} \ C_{i,4}]^T \\ T^{(i)} = [P^{(i)}]^{-1} Q^{(i)} \end{cases} \quad (7)$$

$$P^{(i)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ k_{i+1} & 0 & k_{i+1} & 0 \\ 0 & -\lambda_i k_{i+1}^2 & 0 & -\lambda_i k_{i+1}^2 \\ -\lambda_i k_{i+1}^3 & 0 & -\lambda_i k_{i+1}^3 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

振动方程可由伯努利-欧拉梁理论表示:

$$\frac{\partial^2 \left[ D_i(x) \frac{\partial^2 h_i(x)}{\partial x^2} \right]}{\partial x^2} - \omega^2 m_i(x) h_i(x) = 0, \quad (1)$$

其中:  $D_i(x)$  和  $m_i(x)$  分别为第  $i$  阶梯梁的抗弯截面刚度和单位梁长的质量。  $h_i(x)$  为梁的振型函数。  $\omega$  为悬臂梁的自振频率。令  $k_i^4 = \omega^2 m_i / (EI_i)$ ,  $E$  为弹性模量,  $I_i$  为惯性矩。

求解式(1)得:

$$h_i(x) = c_{i,1} \sin(k_i x) + c_{i,2} \cos(k_i x) + c_{i,3} \sinh(k_i x) + c_{i,4} \cosh(k_i x). \quad (2)$$

悬臂梁结构由压电复合段和多阶梯延伸段组成,假设压电层与第  $i$  阶梯梁的右边缘重合,且各个阶梯等宽度,则计算各个阶梯的刚度和有效质量为:

复合段:

$$\begin{cases} D_i = \frac{E_p^2 t_p^4 + E_{np}^2 t_i^4 + 2 E_p E_{np} t_p t_i (2 t_p^2 + 2 t_i^2 + 3 t_p t_i)}{12 (E_p t_p + E_{np} t_i)} W \\ m_i = (\rho_p t_p + \rho_{np} t_i) W \end{cases} \quad (3)$$

延伸段:

$$\begin{cases} D_i = \frac{E_{np} t_i^3}{12} W \\ m_i = \rho_{np} t_i W \end{cases} \quad (4)$$

其中:  $E_{np}, \rho_{np}$  分别表示非压电层材料的弹性模量和质量密度;  $E_p, \rho_p$  分别表示压电层材料的弹性模量和质量密度;  $t_p$  表示压电层的厚度;  $t_i$  表示悬臂梁各段厚度;  $W$  表示梁的宽度。

临近第  $i$  个截面处相邻两个阶梯的振型函数可以表示为:

$$Q^i = \begin{bmatrix} \sin k_i l_i & \cos k_i l_i & \sinh k_i l_i & \cosh k_i l_i \\ k_i \cos k_i l_i & -k_i \sin k_i l_i & k_i \cosh k_i l_i & k_i \sinh k_i l_i \\ -k_i^2 \sin k_i l_i & -k_i^2 \cos k_i l_i & k_i^2 \sinh k_i l_i & k_i^2 \cosh k_i l_i \\ -k_i^3 \cos k_i l_i & k_i^3 \sin k_i l_i & k_i^3 \cosh k_i l_i & k_i^3 \sinh k_i l_i \end{bmatrix}. \quad (9)$$

左端固定端和第  $n$  阶梯右端自由端的边界条件为:

$$\begin{cases} h_1(0) = h_1'(0) = 0 \\ h_{n+1}''(l_n) = h_{n+1}'''(l_n) = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

悬臂梁第一阶梯的振型系数  $\{C_{1,1}, C_{1,2}, C_{1,3}, C_{1,4}\}^T$  与第  $n$  阶梯振型函数系数  $\{C_{n+1,1},$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} -\sin(k_{n+1} l_n) & -\cos(k_{n+1} l_n) & \sinh(k_{n+1} l_n) & \cosh(k_{n+1} l_n) \\ -\cos(k_{n+1} l_n) & \sin(k_{n+1} l_n) & \cosh(k_{n+1} l_n) & \sinh(k_{n+1} l_n) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

由第 1 阶梯的边界条件式(13)得到:

$$\begin{cases} C_{1,2} + C_{1,4} = 0 \\ C_{1,1} + C_{1,3} = 0 \end{cases}. \quad (14)$$

联立式(11)和式(14)得到:

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} & \Gamma_{14} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} & \Gamma_{23} & \Gamma_{24} \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

引入 Heviside 函数  $H$ , 得到多阶梯梁的  $n$  阶振型函数:

$$h_n(x) = h_{1,n}(x) + \sum_{i=1}^n [h_{i+1,n}(x) - h_{i,n}(x)] H(x - l_i). \quad (16)$$

为了满足方程组存在非零解, 方程组系数行列式为零, 可计算得到不同阶梯悬臂梁各阶振动模态所对应的波矢量  $k_{i,n}$  和各阶梯梁的振型函数。由此, 计算各阶梯的  $n$  阶谐振频率:

$$f_n^2 = \frac{\int_0^l D(x) (h_n''(x))^2 dx}{4\pi^2 \int_0^l m(x) (h_n(x))^2 dx} = \frac{K^{ne}}{M^{ne}}. \quad (17)$$

假设吸附集中质量位于自由端处且不引起有效刚度的变化,  $n$  阶谐振频率就会发生变化得到附加质量与所引起的频率变化之间的隐式关系为:

$$\Delta f_n^2 + 2f_n \Delta f_n - f_n^2 \frac{\Delta m h_n^2}{M_{ne} + \Delta m h_n^2} = 0, \quad (18)$$

其中:  $\Delta m$  为吸附质量,  $\Delta f_n$  为吸附质量  $\Delta m$  后的  $n$  阶谐振频率变化值,  $M_{ne}$  为有效质量。

当附加质量远小于悬臂梁有效质量时, 由式(18)可以得到传感器灵敏度的近似表达式为:

$$S_n = \frac{\Delta f_n}{\Delta m} = \frac{f_n h_n^2}{2M_{ne}}. \quad (19)$$

$C_{n+1,2}, C_{n+1,3}, C_{n+1,4}\}^T$  之间的关系可表示为:

$$\Gamma [C_{1,1} \ C_{1,2} \ C_{1,3} \ C_{1,4}]^T = [0 \ 0]^T, \quad (11)$$

式中:

$$\Gamma = \Lambda \Gamma^{(n)} \Gamma^{(n-1)} \dots \Gamma^{(2)} \Gamma^{(1)}, \quad (12)$$

### 3 优化模型

为了寻求满足灵敏度最大的悬臂梁构型, 需要将灵敏度最大化问题转化为特定函数最小值的优化目标。为此, 引入灵敏度符号  $S = \Delta f / \Delta m$ , 将目标函数设定为  $F_{obj} = C - S$ 。在实际循环中, 将目标函数进一步转换为  $F_{obj} = C - \Delta f$ ,  $C$  远大于  $\Delta f$ 。采用零阶优化方法、一阶优化方法与等步长搜索法三种方法结合获取相对精确的数值。

为便于与传统的矩形梁结构传感器灵敏度比较, 在具体的优化过程中, 将悬臂梁的固定端厚度设为定值, 即梁  $n$  等分之后, 第 1 阶梯梁的厚度保持不变 ( $t_1 = 0.4 \text{ mm}$ ), 第 2 ~  $n$  阶梯梁的厚度在一定范围内变化, 共有  $n - 1$  个设计变量,  $t_2, t_3, \dots, t_n$ 。根据传感器吸附质量前后灵敏度的分析表达式, 列出优化列式:

$$\begin{aligned} & \text{Find } t_i (i=2, 3, \dots, n) \\ & \min F_{obj} = C - \Delta f \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \Delta f = \frac{\lambda'^2_1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_e}} - \frac{\lambda'^2_1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M_e + \Delta m}} \\ l_{np} = l_{np0} \\ l_p = l_{p0} \\ \tau\omega = \tau\omega_0 \\ t_1 = t_{10} \\ t_p = t_{p0} \\ t_0 < t_i < t_{\max} \\ C \gg \Delta f \end{cases}, \quad (20) \end{aligned}$$

式中:  $l_{np0}$  和  $l_{p0}$  为弹性梁和压电层的长度,  $\tau\omega_0$  为梁宽度,  $t_{10}$  和  $t_{p0}$  为弹性梁和压电层的厚度,  $t_0$  和  $t_{\max}$  为厚度  $t_i$  的可设计范围。

## 4 数值模拟

设定悬臂梁初始构型参数如表 1 所示,借助优化模型式(18),优化得到 1~5 阶模态灵敏度最优构型如图 3 所示,灵敏度提升情况如表 2 所示。数值结果表明,通过改变不同阶振动模式下悬臂梁结构的构型可以有效提升传感器的灵敏度。例如,一阶振动模式下四阶梯悬臂梁传感器谐振频率和灵敏度为  $1\,573.7\text{ Hz}$  和  $12.9 \times 10^4\text{ Hz/g}$ ,而同尺寸矩形悬臂梁传感器的谐振频率和灵敏度为  $1\,321.0\text{ Hz}$  和  $0.95 \times 10^4\text{ Hz/g}$ ,灵敏度达到等厚度梁结构传感器的 13.6 倍。另外,五阶振动模式下,五阶梯悬臂梁传感器灵敏度为  $33.9 \times 10^4\text{ Hz/g}$ ,为同尺寸矩形悬臂梁传感器灵敏度  $2.2 \times 10^4\text{ Hz/g}$  的 15.4 倍,较同尺寸一阶模态传感器提升了 35.0 倍。

表 1 多阶梯悬臂梁基本尺寸

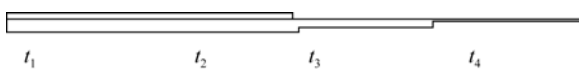
Tab. 1 Parameters of multi-stepped mass sensor

参数	多阶梯悬臂梁	压电层
长度/mm	17.6	8.5
宽度/mm	4.0	4.0
厚度/mm	$t_1 \sim t_n$	0.2
弹性模量 $E/\text{GPa}$	120	76.5
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$7.35 \times 10^3$	$7.5 \times 10^3$

表 2 1~5 阶模态灵敏度提升情况

Tab. 2 Sensitivity improving at 1—5<sup>th</sup> order mode

传感器 模态	等截面梁传感器 灵敏度/ $(\text{Hz} \cdot \text{g}^{-1})$	多阶梯梁传感器灵敏度		提升倍数
		最优构型 阶梯数	灵敏度 / $(\text{Hz} \cdot \text{g}^{-1})$	
一阶模态	$0.95 \times 10^4$	4	$12.9 \times 10^4$	13.6
二阶模态	$2.16 \times 10^4$	6	$21.6 \times 10^4$	10.0
三阶模态	$6.56 \times 10^4$	9	$7.99 \times 10^4$	1.2
四阶模态	$2.0 \times 10^4$	3	$15.5 \times 10^4$	7.75
五阶模态	$2.2 \times 10^4$	5	$33.9 \times 10^4$	15.4



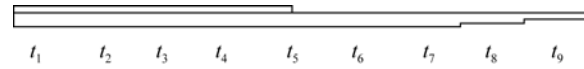
(a) 一阶模态四阶梯梁构型

(a) 4 stepped cantilever in the first vibration mode



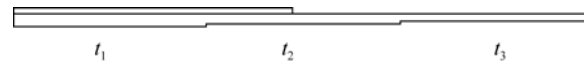
(b) 二阶模态六阶梯梁构型

(b) 6 stepped cantilever in the second vibration mode



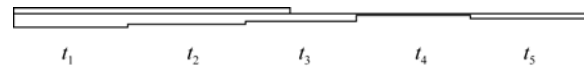
(c) 三阶模态九阶梯梁构型

(c) 9 stepped cantilever in the third vibration mode



(d) 四阶模态三阶梯梁构型

(d) 3 stepped cantilever in the fourth vibration mode



(e) 五阶模态五阶梯梁构型

(e) 5 stepped cantilever in the fifth vibration mode

图 3 高阶模态悬臂梁最优构型

Fig. 3 Optimized configuration of high mode cantilever

## 5 实验

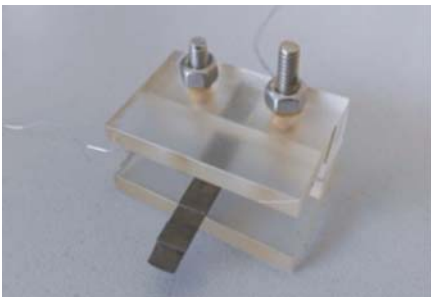
为验证借助多阶梯悬臂梁构型优化设计提升传感器灵敏度方法的可行性,利用弹簧钢材料借助线切割工艺研制了如图 4 所示的六阶梯悬臂梁和矩形等截面悬臂梁结构,并采用 PZT5 作为驱动和敏感材料,制备了两种微质量传感器样件。多阶梯悬臂梁的各阶梯长度均为  $2.93\text{ mm}$ ,厚度分别为  $t_1 = 0.4\text{ mm}$ ,  $t_2 = 0.35\text{ mm}$ ,  $t_3 = 0.4\text{ mm}$ ,  $t_4 = 0.3\text{ mm}$ ,  $t_5 = 0.4\text{ mm}$ ,  $t_6 = 0.045\text{ mm}$ ,其余结构和材料参数如表 1 所示。为了便于对比,矩形等截面悬臂梁传感器的截面外形尺寸、材料参数、压电层及弹性梁长度与多阶梯梁传感器相同,弹性梁长为  $17.6\text{ mm}$ ,宽度为  $4.0\text{ mm}$ ,厚度为  $0.4\text{ mm}$ ,压电层长度为  $8.5\text{ mm}$ ,厚度为  $0.2\text{ mm}$ 。

实验中,Agilent4294A 精密阻抗分析仪搭建微质量传感器的测试平台,利用细长导线将压电层的两个电极连接于阻抗分析仪的输入端进行频率扫描测试,测试过程中采用的被测微小质量为提前校准好的细铜丝,系统如图 5 所示。通过测试吸附微小质量前后传感器的谐振频率变化量,测算得到其灵敏度。



(a) 矩形截面梁传感器

(a) Mass sensor with rectangular cantilever



(b) 六阶梯梁传感器

(b) Mass sensor of 6 stepped cantilever

图 4 悬臂梁式微质量传感器样品

Fig. 4 Micro-mass sensors samples

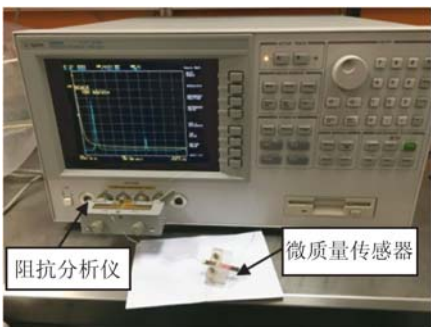


图 5 传感器灵敏度测试系统

Fig. 5 Testing system of mass detection sensitivity

实验结果表明,六阶梯悬臂梁式微质量传感器的二阶模态谐振频率为 5 404.0 Hz,灵敏度为  $18.8 \times 10^4$  Hz/g,其灵敏度变化曲线如图 6 所示。灵敏度仿真结果与实验偏差为 14.8%,误差主要源于压电片黏接过程中导电胶的涂覆层和导线质量。另外,线切割加工精度也会对实验结果产生影响。另外,多阶梯结构也会影响传感器的量程和所对应的线性度。随着灵敏度的提升,为了保证吸附有被测质量的高阶模态微传感器仍工作在线性范畴,其有效量程必然减小。数值仿真结果

表明,在较小的量程内,6 阶梯梁传感器的线性度远高于等截面梁传感器。例如,在 200  $\mu$ g 量程内,六阶梯梁微质量传感器的线性度达到 0.256%,远高于等截面梁传感器的线性度 0.889%。但随着量程的不断增大,6 阶梯梁传感器的线性度有所降低,6 阶梯梁传感器的线性度有所下降,具体如表 3 所示。另外,传感器的重复性不受阶梯数量的影响。

表 3 传感器线性度与量程之间的关系

Tab. 3 Variation of sensor linearity with the measuring range

量程/ $\mu$ g	线性度/%	
	6 阶梯悬臂梁	等截面梁
200.0	0.256	0.889
300.0	0.496	0.703
400.0	0.543	0.58
500.0	0.64	0.46
600.0	1.024	0.404

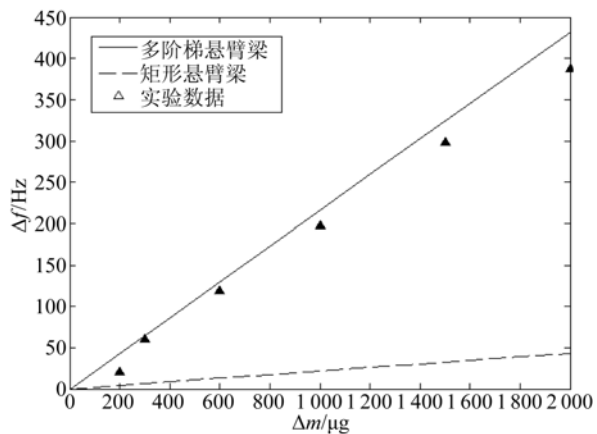


图 6 二阶模态下 6 阶梯梁式传感器灵敏度变化曲线

Fig. 6 Sensitivity in the second order mode of the six stepped cantilever sensor

## 6 结 论

本文提出基于高阶模态悬臂梁构型优化的微质量传感器灵敏度提升方法,建立了在不同振动模态下满足灵敏度最高的悬臂梁构型优化设计模型,使同尺寸传感器在同阶振动模态下的探测灵敏度提升了 10.0~15.0 倍。以二阶振动模态下的通过优化得到的六阶梯悬臂梁传感器为例,在相同的外形尺寸条件下(总长度为 17.6 mm),传感器谐振频率和灵敏度分别为 5 404.0 Hz 和  $21.6 \times 10^4$  Hz/g,

为传统矩形悬臂梁传感器灵敏度的 10.0 倍。所研制的试验样件灵敏度为  $18.8 \times 10^4$  Hz/g, 仿真与实

验结果基本一致, 从而验证了方法的有效性和可行性。

#### 参考文献:

- [1] LUBCZYK D, SIERING C, LÖRGEN J, *et al.*. Simple and sensitive online detection of triacetone triperoxide explosive [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2010, 143(2): 561-566.
- [2] BURG T P, GODIN M, KNUDSEN S M, *et al.*. Weighing of biomolecules, single cells and single nanoparticles in fluid [J]. *Nature*, 2007, 446(2): 1066-1069.
- [3] MERTENS J, ROGERO C, CALLEJA M, *et al.*. Label-free detection of DNA hybridization based on hydration-induced tension in nucleic acid films [J]. *Nature Nanotechnology*, 2008, 3: 301-307.
- [4] CARTER R M, MEKALANOS J J, JACOBS M B, *et al.*. Quartz crystal microbalance detection of *Vibrio cholerae* O139 serotype [J]. *Journal of immunological methods*, 1995, 187(1): 121-125.
- [5] PARK I S, KIM N. Thiolated *Salmonella* antibody-immobilization onto the gold surface of piezoelectric quartz crystal [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 1998, 13(10): 1091-1097.
- [6] ANSARI M Z, CHO C, KIM J, *et al.*. Comparison between deflection and vibration characteristics of rectangular and trapezoidal profile microcantilevers [J]. *Sensors*, 2009, 9(4): 2706-2718.
- [7] 高仁璟, 赵剑. 基于槽式悬臂梁结构的微质量传感器设计 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(1): 102-108.
- GAO R J, ZHAO J. Design and analysis of micro-mass sensor based on I-shaped cross-section cantilever [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(1): 102-108. (in Chinese)
- [8] SHEN Z, SHIH W Y, SHIH W H. Mass detection sensitivity of piezoelectric cantilevers with a nonpiezoelectric extension [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(6): 065101.
- [9] YI J W, SHIH W Y, SHIH W H. Effect of length, width, and mode on the mass detection sensitivity of piezoelectric unimorph cantilevers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, 91(3): 1680-1686.
- [10] LIAO H S, HUANG K Y, CHANG C S. Cantilever-based mass sensor using high order resonances for liquid environment [C]. *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM)*, 2011: 652-655.
- [11] LOCHON F, DUFOUR I, REBIERE D. An alternative solution to improve sensitivity of resonant microcantilever chemical sensors: comparison between using high-order modes and reducing dimensions [J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2005, 108(1): 979-985.
- [12] GHATKESAR M K, BARWICH V, BRAUN T, *et al.*. Higher modes of vibration increase mass sensitivity in nanomechanical microcantilevers [J]. *Nanotechnology*, 2007, 18(44): 445502.
- [13] YI J W, SHIH W Y, MUTHARASAN R, *et al.*. In situ cell detection using piezoelectric lead zirconate titanate-stainless steel cantilevers [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(1): 619-625.
- [14] KUMAR V, BOLEY J W, EKOWALUYO H, *et al.*. Linear and nonlinear mass sensing using piezoelectrically-actuated microcantilevers [C]. *MEMS and Nanotechnology*, 2010, 2: 57-65.

#### 作者简介:



赵剑(1980—),男,河北石家庄人,教授,博士生导师,2008年于西安电子科技大学获博士学位,主要从事非线性传感器、智能微结构和多稳态柔性机构等方面的研究。E-mail: jzhao@dlut.edu.cn

#### 通讯作者:



高仁璟(1964—),女,山东烟台人,教授,博士生导师,主要从事左手材料、生物传感器、电路与系统等方面的研究。E-mail: renjing@dlut.edu.cn