

文章编号 1004-924X(2012)01-0102-07

## 基于槽式悬臂梁结构的微质量传感器设计

高仁璟<sup>1\*</sup>, 赵剑<sup>1</sup>, 李雪<sup>2</sup>, 唐祯安<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学汽车工程学院, 辽宁大连 116024

2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁大连 116024)

**摘要:** 压电式微质量传感器的测试精度直接依赖于结构频率对质量变化的灵敏程度。本文利用对称槽型梁和压电薄膜组成的对称敏感结构, 提出了一种提高传感器灵敏度的结构设计方法, 并设计了一种高精度谐振式微质量传感器。建立了结构频率变化对吸附质量敏感性的分析模型, 并研究了槽型截面参数、自振频率及振动模态对灵敏度的影响。与矩形截面结构进行了仿真与实验对比, 结果表明, 相同几何尺寸参数下, 槽型截面悬臂梁的一阶自振频率为 1 851 Hz, 矩形截面悬臂梁的一阶自振频率为 1 610 Hz, 相应的传感器灵敏度则分别为  $3.12 \times 10^4$  Hz/g 和  $1.5 \times 10^4$  Hz/g, 前者是后者的 2 倍。该项设计为提高微质量传感器灵敏度提供了一种新思路。

**关键词:** 质量传感器; 槽型悬臂梁; 压电薄膜; 灵敏度

**中图分类号:** TH715.1; TN384 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122001.0102

## Design and analysis of micro-mass sensor based on I-shaped cross-section cantilever

GAO Ren-jing<sup>1\*</sup>, ZHAO Jian<sup>1</sup>, LI Xue<sup>2</sup>, TANG Zhen-an<sup>2</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. School of Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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

**Abstract:** As the sensitivity of a piezoelectric mass sensor directly depends on the structural frequency variation induced by the mass added. This paper proposes a structure designing method for improving the measuring sensitivity of the mass sensor by using a structure which consists of a symmetrical trough (I-shaped cross-section) cantilever and piezoelectric films. Then, we design and fabricate a novel piezoelectric resonance micro-mass sensor. Considering the influences of the section shape, natural frequency and the vibration mode on the sensitivity, an analytical model is established for analyzing the frequency variation caused by the micro particles. With the same geometric parameters, the simulation and experiments are performed for the sensors with the I-shaped cross-section cantilever and the rectangular section cantilever. It shows that the first order natural frequency of the I-shape cross-section cantilever is 1 851 Hz, and that of the rectangular section cantilever is 1 610 Hz. Moreover, corresponding sensor sensitivities are  $3.12 \times 10^4$  and  $1.5 \times 10^4$  Hz/g, respectively, and the former is twice of the latter. The method is feasible and effective for improving the measuring precision of mass sensors.

**Key words:** mass sensor; I-shaped cross-section cantilever; piezoelectric film; sensitivity

收稿日期: 2011-06-14; 修订日期: 2011-07-19.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2011CB610304); 教育部博士学科点基金资助项目 (No. 20090041110023, No. 20100041120019)

## 1 引言

压电谐振式微质量传感器是以压电材料为换能器的新型传感器<sup>[1-4]</sup>,利用传感器吸附物质后谐振频率的变化来实现对待测物质的定性和定量分析,它集激励与传感功能于一体,具有结构简单、响应快,成本低和精度高的特点,并且测试过程中无需昂贵的光学位移检测系统和化学分析仪器、不受使用环境限制等,因此,在汽车、航空航天、生物医学、化学、环保、军事等领域有广泛的应用前景。

根据压电谐振式质量传感器的测量原理,其测试精度强烈依赖于结构频率对质量变化后的敏感程度和压电材料属性。除了将具有高频率常数的 PZT 压电材料应用于传感器微加工之外<sup>[3-5]</sup>,研究人员还在结构设计方面进行了大量的研究工作。Shih, Yi, Li 等<sup>[6-9]</sup>提出了一种 PZT 压电层与弹性层长度一致的悬臂梁式传感器,并分析了悬臂梁长度、厚度及模态对灵敏度的影响程度;但由于受等长度双层梁结构形式的限制,传感器各阶频率与基频的比为常数,灵敏度仅为  $3.6 \times 10^4$  Hz/g,且压电层无法浸入到液体测量环境。作为改进,Shen 等<sup>[10-11]</sup>设计了一种压电层和弹性层长度不同的质量传感器,使得同尺寸参数下传感器的灵敏度提高了 36%,达到  $4.8 \times 10^4$  Hz/g,但论文同时指出,在现有条件下提高灵敏度的唯一方法是缩小结构尺寸,提高结构的自振频率。借助迅速发展的微细加工技术,研究人员通过不断缩小传感器的几何尺度(甚至达到纳米量级)来获得更高的检测灵敏度<sup>[12-19]</sup>(可达  $10 \times 10^{21}$  Hz/g);但由于传感器尺寸微纳米化对测量环境要求较为苛刻,如空气净度、低噪声干扰等,这严重限制了其适用范围。综上所述,在一定几何尺度约束下,综合考虑传感器结构尺寸、测量难易程度和实用性之间关系的高灵敏度质量传感器设计逐渐成为研究热点<sup>[20-22]</sup>。

影响悬臂梁传感器质量灵敏度的因素包括压电薄膜的绝缘性、悬臂梁的尺寸、悬臂梁的结构等因素。本文利用槽型截面梁结构作为微质量传感器的基本弹性单元,通过改变槽结构参数来提升传感器的自振频率,进而提高传感器的灵敏度;并

建立了槽结构参数、自振频率及传感器灵敏度之间的关系模型,以分析传感器截面形式、结构几何尺寸参数以及谐振模态对检测敏感度的影响。通过几何尺寸参数优化设计,与文献[11]压电层和弹性层长度不等的质量传感器同参数下,槽型截面悬臂梁传感器的灵敏度提高了 150%。最后,通过数值仿真和实验进一步验证了本文所提出的槽型截面微质量传感器设计方法的有效性,为高灵敏度质量传感器的设计提供了借鉴和参考。

## 2 槽型截面悬臂梁的结构设计

压电式微质量传感器主要通过将微小质量转化成比较容易测量的频率差来获得待测物的质量,因而其灵敏度与弹性元件和压电层的几何参数及材料属性直接相关。传统的微质量传感器主要采用矩形截面梁作为关键元件,如图 1 所示。本文利用悬臂梁自振频率、结构刚度和有效质量之间的关系,通过改变悬臂梁的截面形状设计了一种新型压电式微质量传感器,主要由上下两层压电敏感层和槽型截面弹性梁组成,结构如图 2 所示,其中  $l_1, l_2$  分别为压电复合层和延伸层的长度,  $w$  为梁结构的宽度,  $t_1, t_2$  分别为压电敏感层和槽型截面弹性梁的厚度,  $x_2, y_2$  为槽的总宽度和高度。压电层与弹性梁长度不同,延伸部分为待测质量称重端。当延伸部分置于某种液体中或表面吸附微质量时,传感器的谐振频率会发生明显变化,利用频率差与待测物质量之间的关系<sup>[8]</sup>:  $\Delta f / \Delta m \propto v_n^2 / l^3 w$ , 计算得到延伸部分吸附物的质量,其中  $v_n$  为第  $n$  阶模态无量纲特征值,  $l$  和  $w$  分别为悬臂梁的长度和宽度;进而确定结构设计参数、自振频率及灵敏度之间的关系表达式。

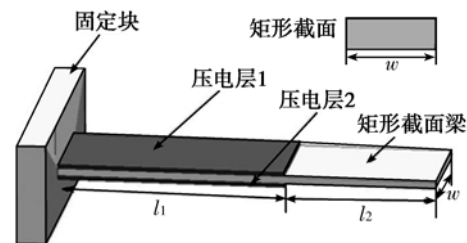


图 1 矩形截面悬臂梁式微质量传感器结构

Fig. 1 Structure of mass sensor with rectangular cantilever

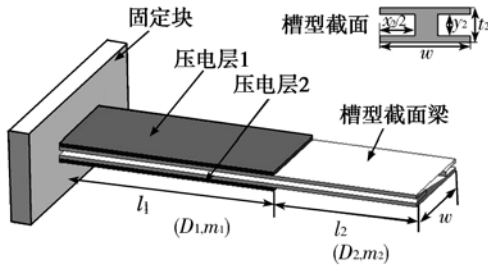


图 2 槽型悬臂梁式微质量传感器结构

Fig. 2 Structure of mass sensor with I-shaped cross-section cantilever

### 3 数学模型

假设压电层与弹性梁层无缝隙粘合,吸附质量对梁结构频率无影响,且两层宽度相等,如图 2 所示。根据伯努利-欧拉梁理论,以固定端为坐标原点,建立梁弯曲振动方程为:

$$D(x) \frac{d^4 Y(x)}{dx^4} - \omega^2 m(x) Y(x) = 0, \quad (1)$$

其中,  $D(x)$  和  $m(x)$  分别为抗弯刚度和单位梁长的质量,  $\omega$  为自振频率,  $Y(x)$  为振幅。

令  $k^4 = \frac{\omega^2 m}{EI}$ , 式中  $E$  为结构的弹性模量,  $I$  为惯性矩, 求解方程(1)得:

$$Y(x) = C_1 \sin(kx) + C_2 \cos(kx) + C_3 \sinh(kx) + C_4 \cosh(kx). \quad (2)$$

悬臂梁结构由压电复合层段和延伸段两部分组成, 分别计算各段的刚度和有效质量为:

$$D_1 = 2E_1 \left[ \frac{\omega t_1^3}{12} + \omega t_1 \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right)^2 \right] + E_2 \frac{\omega t_2^3 - x_2 y_2^3}{12}, \quad (3)$$

$$m_1 = 2\rho_1 t_1 \omega + \rho_2 (\omega t_2 - x_2 y_2), \quad (4)$$

将边界条件式(9)~(16)代入方程(7)和(8), 得到方程组:

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2^2 \sin(k_2(l_1+l_2)) & -k_2^2 \cos(k_2(l_1+l_2)) & k_2^2 \sinh(k_2(l_1+l_2)) & k_2^2 \cosh(k_2(l_1+l_2)) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_2^2 \cos(k_2(l_1+l_2)) & k_2^2 \sin(k_2(l_1+l_2)) & k_2^2 \cosh(k_2(l_1+l_2)) & k_2^2 \sinh(k_2(l_1+l_2)) \\ \sin(k_1 l_1) & \cos(k_1 l_1) & \sinh(k_1 l_1) & \cosh(k_1 l_1) & -\sin(k_2 l_1) & -\cos(k_2 l_1) & -\sinh(k_2 l_1) & -\cosh(k_2 l_1) \\ k_1 \cos(k_1 l_1) & -k_1 \sin(k_1 l_1) & k_1 \cosh(k_1 l_1) & k_1 \sinh(k_1 l_1) & -k_2 \cosh(k_2 l_1) & k_2 \sin(k_2 l_1) & -k_2 \cosh(k_2 l_1) & -k_2 \sinh(k_2 l_1) \\ -D_1 k_1^2 \sin(k_1 l_1) - D_1 k_1^2 \cos(k_1 l_1) & D_1 k_1^2 \sinh(k_1 l_1) & D_1 k_1^2 \cosh(k_1 l_1) & D_2 k_2^2 \sin(k_2 l_1) & D_2 k_2^2 \cos(k_2 l_1) & -D_2 k_2^2 \sinh(k_2 l_1) & -D_2 k_2^2 \cosh(k_2 l_1) & \\ -D_1 k_1^3 \cos(k_1 l_1) & D_1 k_1^3 \sin(k_1 l_1) & D_1 k_1^3 \cosh(k_1 l_1) & D_1 k_1^3 \sinh(k_1 l_1) & D_2 k_2^3 \cos(k_2 l_1) & -D_2 k_2^3 \sin(k_2 l_1) & -D_2 k_2^3 \cosh(k_2 l_1) & -D_2 k_2^3 \sinh(k_2 l_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{13} \\ C_{14} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{23} \\ C_{24} \end{bmatrix} = 0. \quad (17)$$

$$D_2 = E_2 \frac{\omega t_2^3 - x_2 y_2^3}{12}, \quad (5)$$

$$m_2 = \rho_2 (\omega t_2 - x_2 y_2). \quad (6)$$

其中,  $D_1, D_2$  分别为两段的刚度;  $m_1, m_2$  为压电层与槽型梁层的有效质量;  $E_1, \rho_1$  为压电层的杨氏模量和密度;  $E_2, \rho_2$  为槽型梁层的杨氏模量和密度。

根据式(2)得到各部分梁的振幅函数表达式。

截面 1:

$$Y_1(x) = C_{11} \sin(k_1 x) + C_{12} \cos(k_1 x) + C_{13} \sinh(k_1 x) + C_{14} \cosh(k_1 x). \quad (7)$$

截面 2:

$$Y_2(x) = C_{21} \sin(k_2 x) + C_{22} \cos(k_2 x) + C_{23} \sinh(k_2 x) + C_{24} \cosh(k_2 x). \quad (8)$$

根据图 2 中梁结构的几何边界条件和力边界条件, 包括:

(1) 固定端  $x=0$  处:

$$Y_1(0) = 0, \quad (9)$$

$$\frac{dY_1}{dx}(0) = 0. \quad (10)$$

(2) 自由端  $x=l_1+l_2$  处:

$$\frac{d^2 Y_2}{dx^2}(l_1+l_2) = 0, \quad (11)$$

$$\frac{d^3 Y_2}{dx^3}(l_1+l_2) = 0. \quad (12)$$

(3) 压电层的自由端面处满足位移、转角、弯矩和剪力连续的条件:

$$Y_1(l_1) = Y_2(l_1), \quad (13)$$

$$\frac{dY_1}{dx}(l_1) = \frac{dY_2}{dx}(l_1), \quad (14)$$

$$D_1 \frac{d^2 Y_1}{dx^2}(l_1) = D_2 \frac{d^2 Y_2}{dx^2}(l_1), \quad (15)$$

$$D_1 \frac{d^3 Y_1}{dx^3}(l_1) = D_2 \frac{d^3 Y_2}{dx^3}(l_1). \quad (16)$$

为了满足方程组存在非零解,方程组系数行列式为零,进而确定悬臂梁两部分的波矢  $k$  和梁长  $l$  的关系式为:

$$\begin{aligned}
 & k_1^4 D_1^2 (1 + \cos(k_1 l_1) \cosh(k_1 l_1))(1 + \cos(k_2 l_2) \cosh(k_2 l_2)) + \\
 & k_2^4 D_2^2 (\cos(k_1 l_1) \cosh(k_1 l_1) - 1)(\cos(k_2 l_2) \cosh(k_2 l_2) - 1) + \\
 & D_1 D_2 k_1^3 k_2 (\cosh(k_1 l_1) \sin(k_1 l_1) + \cos(k_1 l_1) \sinh(k_1 l_1))(-\cosh(k_2 l_2) \sin(k_2 l_2) + \cos(k_2 l_2) \sinh(k_2 l_2)) - \\
 & 2D_1 D_2 k_1^2 k_2^2 \sin(k_1 l_1) \sin(k_2 l_2) \sinh(k_1 l_1) \sinh(k_2 l_2) + \\
 & D_1 D_2 k_1 k_2^3 (-\cosh(k_1 l_1) \sin(k_1 l_1) + \cos(k_1 l_1) \sinh(k_1 l_1))(\cosh(k_2 l_2) \sin(k_2 l_2) + \cos(k_2 l_2) \sinh(k_2 l_2)) = 0.
 \end{aligned} \tag{18}$$

根据连续性边界条件,两部分的谐振频率满足:

$$f = \frac{k_1^2}{2\pi} \sqrt{\frac{D_1}{m_1}} = \frac{k_2^2}{2\pi} \sqrt{\frac{D_2}{m_2}}. \tag{19}$$

当传感器几何尺寸和材料属性确定后,联立式(18)和(19)可计算得到悬臂梁各阶振动模式所对应的波矢量  $k_{1n}$  和  $k_{2n}$ ,  $n$  为所对应的模式,进而根据式(7)和(8)得到相对应的振幅函数。

#### 4 传感器灵敏度计算

假设被吸附物质均匀地分布在传感器的延伸部分(探头)上,这时传感器结构的自振频率将发生变化。将连续系统转化为单自由度系统,传感器自振频率的变化量与所吸附物质的质量存在以下关系<sup>[11]</sup>:

$$\begin{aligned}
 S_1 = \frac{\Delta f}{\Delta m} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2E_1 \left[ \frac{\omega t_1^3}{12} + \omega t_1 \left( \frac{t_1 + t_2}{2} \right)^2 \right] + E_2 \frac{\omega t_2^3 - x_2 y_2^3}{12}}{2\rho_1 t_1 \omega + \rho_2 (\omega t_2 - x_2 y_2)}}} \\
 \cdot \frac{k_1^2 Y^2(x)}{(2\rho_1 t_1 \omega + \rho_2 (\omega t_2 - x_2 y_2)) \omega \int_0^{l_1} Y^2(x) dx + \rho_2 (\omega t_2 - x_2 y_2) \omega \int_{l_1}^{l_1+t_2} Y^2(x) dx}
 \end{aligned} \tag{22}$$

根据式(22)与文献[11]中矩形截面悬臂梁传感器灵敏度表达式,得到两种传感器灵敏度比值与结构参数之间的关系为:

$$\begin{aligned}
 \tau = \frac{S_1}{S_2} = \frac{k_1'}{k_1} \sqrt{\frac{1 - \alpha\beta^3}{1 - \alpha\beta}} \times \\
 \frac{(2\xi\eta + 1) \int_0^{l_1} Y^2(x) dx + \int_{l_1}^{l_1+t_2} Y^2(x) dx}{(2\xi\eta + 1 - \alpha\beta) \int_0^{l_1} Y^2(x) dx + (1 - \alpha\beta) \int_{l_1}^{l_1+t_2} Y^2(x) dx}
 \end{aligned} \tag{23}$$

其中,  $S_2$  为矩形截面梁传感器的灵敏度,  $k_1'$  为矩形截面悬臂梁的波矢,  $\eta$  为压电材料密度与弹性材料密度之比,  $\xi$  为压电层与弹性层厚度之比。

根据以上推导,在材料属性确定的情况下,数

$$\begin{aligned}
 \frac{\Delta f}{\Delta m} &= \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{D_1}{m_1}} \frac{k_1^2 Y^2(x)}{m_1 \omega \int_0^{l_1} Y^2(x) dx + m_2 \omega \int_{l_1}^{l_1+t_2} Y^2(x) dx} \\
 &= \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{D_2}{m_2}} \frac{k_2^2 Y^2(x)}{m_1 \omega \int_0^{l_1} Y^2(x) dx + m_2 \omega \int_{l_1}^{l_1+t_2} Y^2(x) dx}
 \end{aligned} \tag{20}$$

在尺寸参数和材料属性相同的情况下,槽型截面悬臂梁与矩形截面悬臂梁自振频率比为:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1 - \alpha\beta^3}{1 - \alpha\beta}}, \tag{21}$$

其中,  $\alpha = x_2 / \omega$  为槽宽与梁宽比,  $\beta = y_2 / t_2$  为槽高和梁高比。

将式(3)、(4)、(6)代入式(20)得到槽型梁结构传感器的灵敏度为:

值仿真得到槽型截面梁几何参数对传感器灵敏度的影响曲线,如图 3 所示。

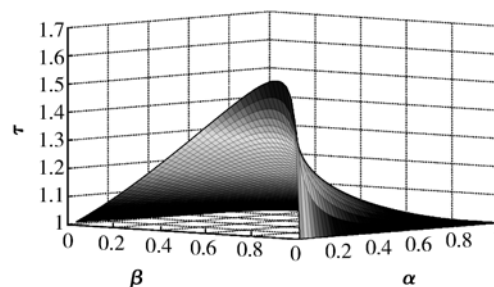


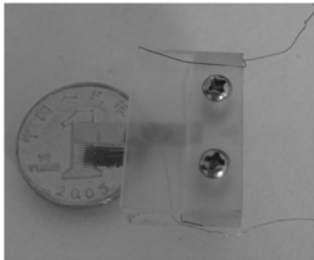
图 3 灵敏度与槽型截面参数的关系

Fig. 3 Relationship between geometric parameters and sensitivity for sensor with I-shaped cross-section cantilever

### 5 仿真与实验验证

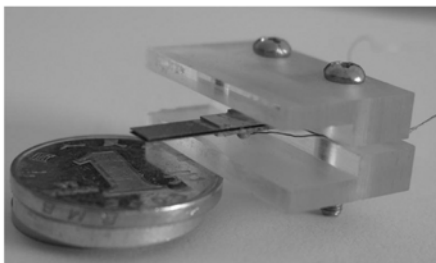
为了验证所设计传感器的性能,对于所提出的槽型截面悬臂梁传感器在文献[11]所给尺寸参数下(压电层长 4.0 mm,厚 0.25 mm,压电层密度为  $\rho_1 = 7.5 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,压电层弹性模量  $E_1 = 6.1 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ,延伸部分长 8.0 mm,宽 4.0 mm,厚为 0.07 mm,密度为  $\rho_2 = 7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,弹性模量  $E_2 = 20.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ )设计出槽的总宽度和高度分别为  $x_2 = 3.2 \text{ mm}$ ,  $y_2 = 0.03 \text{ mm}$ ,仿真得到该槽型截面悬臂梁传感器的灵敏度为  $12.0 \times 10^4 \text{ Hz/g}$ ,而压电层和弹性层长度不等的矩形截面传感器灵敏度为  $4.8 \times 10^4 \text{ Hz/g}$ ,前者比后者灵敏度提高了 150%。

结合目前已有的实验工艺条件,研制了如图 1 和图 2 所示的矩形截面和槽型截面悬臂梁式微小质量传感器,传感器主要由压电薄膜、弹性梁和固定块组成,如图 4 所示。通过细导线引出压电薄膜电极,并接于 WK6500B 阻抗分析仪进行测试,如图 5 所示。



(a) 矩形截面梁传感器

(a) Mass sensor with rectangular cantilever



(b) 槽型截面梁传感器

(b) Mass sensor with I-shaped cross-section cantilever

图 4 微质量传感器

Fig. 4 Micro-mass sensors

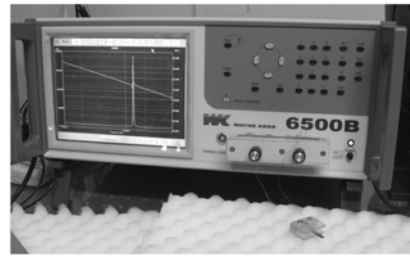


图 5 灵敏度测试装置

Fig. 5 Setup for sensor sensitivity measurement

传感器的结构尺寸和所采用的弹簧钢和 PZT 的材料参数如表 1 所示。

表 1 微质量传感器参数

Tab. 1 Parameters of mass sensor with I-shaped cross-section cantilever

参数	压电层(PZT)	弹性梁(弹簧钢)
$l/\text{mm}$	10	9.5
$t/\text{mm}$	0.25	0.4
$\rho/\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$7.5 \times 10^3$	$7.8 \times 10^3$
$E/\text{Pa}$	$6.1 \times 10^{10}$	$2 \times 10^{11}$
$w/\text{mm}$	4.0	4.0
槽高/mm	—	0.2
槽宽/mm	—	3.2

另外,矩形截面梁传感器的截面外形尺寸、压电层长度以及弹性梁长度与槽型截面悬臂梁传感器相同。在该尺寸下,通过仿真得到槽型截面悬臂梁传感器的灵敏度为  $3.2 \times 10^4 \text{ Hz/g}$ ,矩形截面传感器的灵敏度为  $1.52 \times 10^4 \text{ Hz/g}$ ,在该尺寸下,前者比后者的灵敏度提高了 1 倍,如图 6 所示。

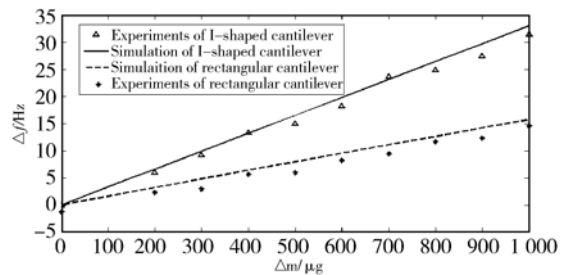


图 6 灵敏度曲线

Fig. 6 Results of sensor sensitivity test

通过阻抗分析仪测试发现,矩形截面悬臂梁的一阶自振频率为1 610 Hz,通过改变截面形状减小悬臂梁结构的有效质量使槽型截面悬臂梁的自振频率达到1 851 Hz,并在悬臂梁末端加载不同质量的微颗粒测得谐振频率变化曲线,如图6所示。从实验结果看出,矩形截面悬臂梁式微质量传感器的灵敏度  $\Delta f/\Delta m=1.5\times 10^4$  Hz/g,槽型截面悬臂梁式传感器的灵敏度  $\Delta f/\Delta m=3.12\times 10^4$  Hz/g。实验测得灵敏度比理论值偏小,与压电薄膜粘接过程中导电胶的涂覆直接相关,即在悬臂梁的固定端部,导电胶已作为附属质量使得传感器的灵敏度变小。考虑到制作工艺及导电胶涂覆的影响在误差范围内,传感器的灵敏度实验结果与仿真结果基本一致,有效验证了利用槽型截面弹性梁结构作为关键弹性元件可以提高微质量传感器的灵敏度。

#### 参考文献:

- [1] WARD M D, BUTTRY D A. In situ interfacial mass detection with piezoelectric transducers [J]. *Science*, 1990, 249: 1000-1007.
- [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] SAKTI S P, ROSLER S, LUCKLUM R, et al.. Thick polystyrene-coated quartz crystal microbalance as a basis of a cost effective immunosensor [J]. *Sens. Actuators A*, 1999, 76(1-3): 98-102.
- [4] LIN Z, YIP C M, JOSHEPH I S, et al.. Operation of an ultrasensitive 30 MHz quartz crystal microbalance in liquids [J]. *Anal. Chem.*, 1993, 65(11): 1546-1551.
- [5] VERISSIMO M I S, MANTAS P Q, SENOS A M R, et al.. Suitability of PZT ceramics for mass sensors versus widespread used quartz crystals [J]. *Sensors and Actuators B*, 2003, 95(1-3): 25-31.
- [6] SHIH W Y, LI X, GU H, et al.. Simultaneous liquid viscosity and density determination using piezoelectric unimorph cantilevers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(2): 1497-1505.
- [7] LI X, SHIH W Y, AKSAY I A, et al.. Electro-

## 6 结 论

本文利用槽型截面梁作为传感器的关键弹性元件,提出了一种提高传感器灵敏度的设计方法,建立了基于槽型梁结构的微质量传感器灵敏度分析模型。实验表明,在相同几何尺度下,矩形截面悬臂梁的一阶自振频率为1 610 Hz,槽型截面悬臂梁的一阶自振频率为1 851 Hz,矩形截面悬臂梁式微质量传感器的灵敏度  $\Delta f/\Delta m=1.5\times 10^4$  Hz/g,槽型截面悬臂梁式传感器的灵敏度  $\Delta f/\Delta m=3.12\times 10^4$  Hz/g,灵敏度与矩形截面结构相比提高了一倍,且具有较好的线性度。在误差允许范围内,实验结果与理论结果基本一致,实验和计算分析验证了本文所提出的高灵敏度质量传感器设计方法的可行性和有效性,进一步拓宽了高精度微质量传感器的设计思路。

- mechanical behavior of PZT-brass unimorphs [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1999, 82(7):1733-1740.
- [8] 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]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 91(3):1680-1686.
- [9] SHIH W Y, LI X, GU H, et al.. Simultaneous liquid viscosity and density determination with piezoelectric unimorph cantilevers [J]. *J. Appl. Phys.*, 2001, 89(2): 1497-1505.
- [10] SHEN Z, SHIH W Y, SHIH W H. Flexural vibrations and resonance of piezoelectric cantilevers with a nonpiezoelectric extension [J]. *IEEE Trans. Ultrason. Ferro. Freq. Control*, 2007, 54(10):2001-2010.
- [11] SHEN Z, SHIH W Y, SHIH W H. Mass detection sensitivity of piezoelectric cantilevers with a nonpiezoelectric extension [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, 77(6): 065101.
- [12] LEE J H, HWANGA K S, PARK J, et al.. Immunoassay of prostate-specific antigen (PSA) using resonant frequency shift of piezoelectric nanomechanical microcantilever [J]. *Biosens. Bioelectron.*, 2005, 20(10): 2157-2162.
- [13] LEE J H, KIM T S, YOON K H. Effect of mass and stress on resonant frequency shift of function-

- alized Pb Zr<sub>0.52</sub>Ti<sub>0.48</sub>O<sub>3</sub> thin film microcantilever for the detection of Creactive protein [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(16): 3187-3189.
- [14] YI J W, SHIH W Y, MUTHARASAN R, *et al.*. In situ cell detection using piezoelectric lead zirconate titanate-stainless steel cantilevers[J]. *J. Appl. Phys.*, 2003, 93(1): 619-625.
- [15] KUMAR V, BOLEY J W, EKOWALUYO H, *et al.*. Linear and nonlinear mass sensing using piezoelectrically-actuated microcantilevers [C]. *Proceedings of the SEM Annual Conference Indianapolis, Indiana, USA, June 7-10, 2010.*
- [16] ADANYI N, VARADI M, KIM N, *et al.*. Development of new immunosensors for determination of contaminants in food[J]. *Current Applied Physics*, 2006, 6(2):279-286.
- [17] LI P, LI X. A single-sided micromachined piezoresistive SiO<sub>2</sub> cantilever sensor for ultra-sensitive detection of gaseous chemicals [J]. *Journal of Micromechanical and Microengineering*, 2006, 16(12):2539-2546.
- [18] YANG J L, ONO T. Mechanical behavior of ultrathin micro-cantilever [J]. *Sensors and Actuators*, 2000, 82(1):102-107.
- [19] LIU M W, WANG J, WANG L D, *et al.*. Deposition and characterization of Pb<sub>(Zr, Ti)</sub>O<sub>3</sub> sol-gel thin films for piezoelectric cantilever beams [J]. *Smart Mater. Struct.*, 2007, 16(1):93-99.
- [20] EKINCI K L, HUANG X M, ROUKES M L. Ultrasensitive nanoelectromechanical mass detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84(22): 4469-4471.
- [21] 陈令新, 关亚凤, 杨丙成, 等. 压电晶体传感器的研究进展[J]. *化学进展*. 2002, 14(1):68-76.  
CHEN L X, GUAN Y F, YANG B CH, *et al.*. Progress in piezoelectric quartz crystal sensors [J]. *Progress in Chemistry*, 2002, 14(1):68-76. (in Chinese)
- [22] 邹志青, 赵建龙. 纳米技术与生物传感器[J]. *传感器世界*, 2004, 10(12):5-11.  
ZOU ZH Q, ZHAO J L. *Nanotechnology and Biosensors*[J]. *Sensor World*, 2004, 10(12):5-11. (in Chinese)

#### 作者简介:



高仁璟(1964—),女,山东烟台人,博士,高级工程师,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



赵剑(1980—),男,河北石家庄人,讲师,2008年于西安电子科技大学获博士学位,主要从事微传感器、非线性力学、多稳态微机构等方面的研究。E-mail: jzhao@dlut.edu.cn



李雪(1986—),女,辽宁大连人,硕士研究生,主要从事微质量传感器的研究。E-mail:lixue026@yahoo.com.cn



唐祯安(1955—),男,辽宁大连人,教授,主要从事半导体传感器及集成电路的研究。