

微加速度计摆片质量的测量方法研究*

李疆 高钟毓 董景新

(清华大学精密仪器与机械学系 北京 100084)

摘要: 梳齿式微机械加速度计摆片的质量是影响其性能的重要机械参数, 获得实测值十分必要。提出一种基于开环频率响应试验和静态静电力试验求取摆片质量的方法, 由加速度计的开环传递函数及摆片的力平衡方程, 得到包含摆片质量的方程组, 通过求解该方程组得出摆片的实际质量。对具体加速度计的试验结果表明, 该方法能准确地估算摆片的实际质量, 并能在制造现场使用, 不需要特殊的测量环境和仪器设备, 是一种简便而有效的试验方法。

关键词: 微机械 加速度计 摆片质量 机械参数

中图分类号: TN305.307 V241.4

0 前言

由于微机械结构往往是一次加工刻蚀成形, 因此微结构的运动特性受加工误差影响较大^[1], 尤其是采用体硅工艺制作的高深宽比的梳齿式结构, 侧向刻蚀会造成梳齿间距、挠性梁机械刚度、摆片质量等重要机械参数的加工误差^[2,3]。摆片质量是重要的机械参数, 不仅直接关系到梳齿式微机械加速度计的实际性能指标, 而且用电测法估算其敏感元件机械参数时, 在计算中不可避免地要用到摆片质量这一参数。

摆片质量微小, 数量级在 0.1 mg, 容易受加工误差影响, 且离散性大。通常测量微小质量可以用微量电子天平直接称重, 但若用于摆片质量测量, 则必须破坏敏感元件的结构, 得到的结果也不完全能代表其他摆片的实际质量。另一种测量摆片质量的方法是镜检法, 用光学显微镜、扫描电镜或原子力显微镜等方法成像, 然后从图像上量取特征尺寸^[4], 或借助计算机数字图像处理技术^[5], 根据得到的几何尺寸计算摆片的实际体积和实际质量。摆片上众多的梳齿和阻尼孔一方面是造成摆片质量加工误差的根本原因, 另一方面也为镜检法带来了难度。另外为得到准确的几何尺寸, 用镜检法观察微机械样品, 有时还需要对样品进行一些预处理, 如表面喷镀等^[6]。因此, 在不破坏敏感元件结构的前提下, 如不借助特殊测量环境和设备, 很难获得摆片的实际质量。

为得到梳齿式敏感元件摆片的实际质量, 提出

一种基于加速度计开环频率响应试验和静态静电力试验计算摆片质量的试验方法。该方法不需要特殊的测量环境和测试设备, 直接利用加速度计的常规试验方法的试验数据就可以求解出摆片的实际质量。通过实际加速度计的试验证明了试验结果有一定的精度, 能够满足工程应用的要求。试验得到的摆片质量估算值一方面可以用来估算加速度计的性能指标, 另一方面还可以应用到其他电测法的计算中, 提高机械参数估算的精度。

1 摆片质量对估计算机参数的影响

在梳齿式微机械加速度计中, 摆片的实际质量不易获得, 其主要原因是由于梳齿式敏感元件结构复杂。如图 1 所示, 摆片质量是中央摆片质量与梳齿质量之和减去阻尼孔的质量, 而梳齿和阻尼孔都是必不可少的结构^[2]。尽管中央摆片尺度大, 加工误差很小, 但众多的梳齿和阻尼孔存在, 使摆片质量容易受加工误差影响, 且离散性大。

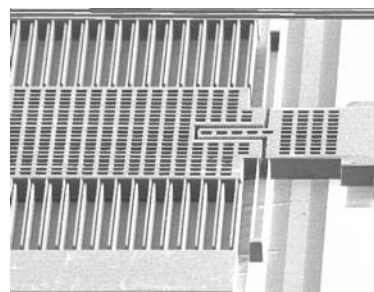


图 1 梳齿式微机械加速度计敏感元件局部结构的扫描电镜图

然而, 摆片质量 m 是重要的机械参数, 不论对加速度计的性能指标, 还是对电测法的参数估计结果都有影响。在其他参数一定的情况下, 摆片质量

* 国家“十五”科技攻关项目(41308050103)。20030119 收到初稿, 20030710 收到修改稿

m 的变化将影响加速度计性能中的自然频率 ω_n 、灵敏度 S 、分辨率 a_{\min} 和闭环满量程 a_{\max} 等指标^[2]。在电测法估计敏感元件机械参数中,如式(1)所示^[2],摆片质量 m 的误差将造成挠性梁机械刚度 k_m 和等效梳齿间距 d_0 的误差。

$$\begin{cases} k_m = m\omega_n^2 \\ d_0 = \sqrt[3]{\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 A_f (U_{\text{ref}}^2 + U_{\text{fb}}^2)}{m(\omega^2 - \omega_n^2)}} \end{cases} \quad (1)$$

式中 k_m ——挠性梁机械刚度
 d_0 ——等效梳齿间距
 ω_n ——敏感元件自然频率

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k_m}{m}}$$

ω ——系统自然频率,可以通过开环频率特性试验得到

$$\omega = \sqrt{\frac{k_m + k_e}{m}}$$

k_e ——静电负刚度

$$k_e = -\frac{2\varepsilon\varepsilon_0 A_f (U_{\text{ref}}^2 + U_{\text{fb}}^2)}{d_0^3}$$

ε ——真空介电常数

ε_0 ——介质的相对介电常数

A_f ——施力电容极板重叠面积

U_{ref} ——预载电压

U_{fb} ——反馈电压

式(1)中等式右边的量除了 m 以外,都可以通过试验变为已知量,由于缺少 m 的实际值,所以在设计值的基础上给出假定等效试验质量,并且考虑到侧向刻蚀的影响,通常采用的等效试验质量略小于设计值。但是这样的假定并不合理,摆片结构的局部放大如图 2 所示,阻尼孔的设计形状为棱柱状,但实际加工后得到的阻尼孔是上下底面尺寸相差很大的漏斗状孔,因此摆片实际质量会大于设计值。因此只有对摆片质量有合理的估计,才能得到更准确的机械参数。

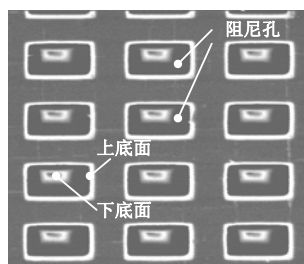


图 2 摆片上阻尼孔的扫描电镜俯视图

2 估算摆片质量 m 的试验方法

在试验中可以通过加速度计开环传递函数求出摆片质量 m ,基本原理如下:加速度计的开环传递函数具有如式(2)所示的一般形式,其中 K_1 为摆片质量 m 和等效梳齿间距 d_0 的函数,见式(4),基于 m 与 d_0 间的函数关系,见式(7),利用 K_1 可以推算出 m 。

$$G(s) = \frac{U_{\text{out}}(s)}{U_{\text{in}}(s)} = \frac{K_1}{s^2 + K_2 s + K_3} \quad (2)$$

于是,设计两个试验,一是用加速度计开环频率响应试验得到开环传递函数 $G(s)$ 中的 K_1 ,二是用静态静电力试验得到 m 与 d_0 间的函数关系,从而求解出 m 。

2.1 加速度计开环频率响应试验

加速度计开环频率响应试验原理如图 3 所示,用 HP35670A 动态信号分析仪测量加速度计的开环频率响应时,HP35670A 输出正弦扫频信号 U_{in} ,在敏感元件施力电极 F_1 和 F_2 上分别施加电压 $U_{\text{ref}} + U_{\text{in}}$ 和 $U_{\text{ref}} - U_{\text{in}}$,产生静电力驱动摆片往复运动;在检测电极 S_1 和 S_2 上施加一对幅值相等相位相差 180° 的正弦载波 U_s 和 $-U_s$,将输入加速度引起的摆片位移 x 变为差动电容的输出电压 U_1 ,通过检测电路将信号放大并解调得到输出电压 U_{out} ^[2]。

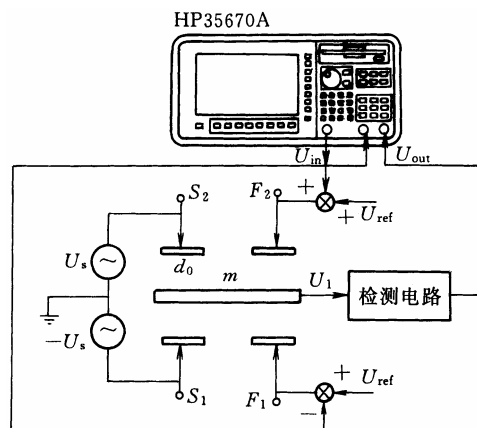


图 3 加速度计开环频率响应试验原理

根据试验原理得到系统原理框图如图 4 所示,相应的开环传递函数 $G(s)$ 如式(3)所示,结合式(2),推导出 K_1 与 m 、 d_0 之间的关系如式(4)所示。图 4 中 A_s 为检测电容极板重叠面积;式(4)中 U_{ref} 、 U_s 和 K_{amp} 是由试验条件决定的已知量, A_f 为施力电容极板重叠面积, $A_f = 2n_f l h$, n_f 为单边检测电极齿数,由于 l 和 h 的尺度较大,加工后的实际尺寸与设计值的误差在 0.5% 以内, A_f 可以作为已知的常数,

因此 K_1 中仅有 m 和 d_0 两项是未知量, 而 K_1 可由试验方法通过动态信号分析仪得到。

$$G(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1}{md_0^3} \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A_f U_{ref} U_s K_{amp}}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{1}{md_0^3} \varepsilon\varepsilon_0 A_f U_{ref} U_s K_{amp} \quad (4)$$

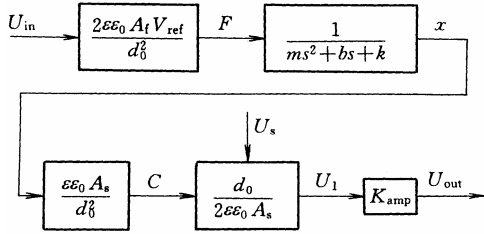


图4 加速度计开环频率响应试验系统原理方框图

2.2 静态静电力试验

静态静电力试验的基本原理是: 在不施加预载电压的前提下, 敏感元件垂直放置时, 受重力加速度作用, 开环电路输出为 U_o ; 当敏感元件水平放置, 在同一侧施力电极上施加直流电压 U_F , 通过静电力 F_e 吸引摆片移动相同的位移 x , 得到相同的开环电路输出 U_o , 此时静电力与摆片的重力相等, 静电力与重力间的关系如式(5)所示。根据摆片在重力加速度作用下的位移变化率, 如式(6)所示的定义, 得到等效梳齿间距如式(7)所示。

$$F_e = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 A U_F^2}{2d_0^2(1-x/d_0)^2} = mg \quad (5)$$

$$K_{sen} = \frac{x}{d_0} = \frac{U_o}{K_{amp} U_s} \quad (6)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon\varepsilon_0 A_f U_F^2}{2mg(1-K_{sen})^2}} \quad (7)$$

综合式(4)、(7)得到摆片质量 m 的计算式如式(8)所示。

$$m = \frac{K_1^2 \varepsilon\varepsilon_0 A_f U_F^6}{8V_{ref}^2 U_s^2 K_{amp}^2 g^3 (1-K_{sen})^6} \quad (8)$$

从式(8)中可以看到, m 的估算精度主要取决于电压 U_F 、 U_{ref} 、 U_s 和每自由落体加速度 g 位移变化率 K_{sen} 的测量精度。其中电压测量的精度主要取决于测量仪器的精度, 一般 1 mV 以上的精度是可以保证的, 相应于 U_F 、 U_{ref} 和 U_s 的精度分别为 0.5%、0.5% 和 1%; K_{sen} 的精度主要受检测电路分布参数的影响, 误差比较大, 采用薄膜集成前置放大电路可以使误差减小到 30%, 但由于 K_{sen} 本身的数量级在 1% 以下, 则 $(1-K_{sen})^6$ 误差在 2% 以下。因此利用式(8)计算得到的 m 误差在 6% 以下。

3 试验结果

根据上述试验方法, 对 9# 加速度计用 HP35670A 进行开环频率响应试验, 得到的开环频率响应曲线如图 5 所示, 根据该曲线得到开环试验传递函数如式(9)所示, 根据式(7)、(8)计算得到的计算值与设计值对比见表 1。从表 1 中可以看到: ①侧向刻蚀使等效梳齿间距 d_0 变大, 加工误差在 60% 以上, 并且 d_0 大于期望值。②尽管 d_0 大于期望值, 摆片质量实际计算结果仍大于考虑到梳齿侧向刻蚀影响得到的设计值, 计算结果比设计值大 4.3%。

$$G_f(s) = \frac{U_{out}(s)}{U_{in}(s)} = \frac{1.190 \times 10^8}{s^2 + 1.474 \times 10^4 s + 1.627 \times 10^8} \quad (9)$$

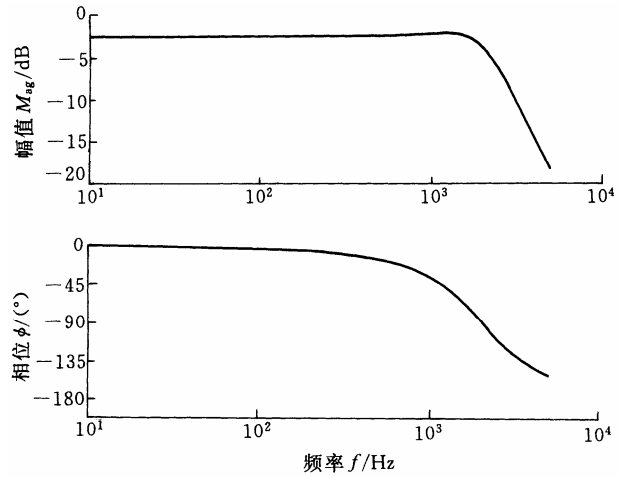


图5 9#加速度计开环频率响应试验曲线

表1 试验结果与设计值对比

	计算值	设计值*
摆片质量 $m / \mu\text{g}$	56.06	53.74
等效梳齿间距 $d_0 / \mu\text{m}$	2.42	1.50

*注: 充分考虑到侧向刻蚀会使等效梳齿间距 d_0 变大, 因此设计时等效梳齿间距的期望值为 2.0 μm , 摆片质量的设计值按照等效梳齿间距为 2.0 μm 计算得到

根据扫描电镜图像得到阻尼孔加工后实际尺寸与设计尺寸对比见表 2, 单个孔的设计体积与实际体积之比约为 75:58, 即单个孔的实际体积缩小了约 22.7%, 根据扫描电镜图中的结构尺寸计算得出摆片体积比设计体积增大约 2.7%, 因此试验中得到的摆片质量计算结果与实际情况相符。

表2 阻尼孔设计尺寸与加工结果的对比

	设计尺寸 $l_0 / \mu\text{m}$	实际尺寸 $l / \mu\text{m}$
上表面长	15.0	19.25
上表面宽	10.0	12.71
下表面长	15.0	7.26
下表面宽	10.0	3.45

4 结 论

摆片质量是影响加速度计性能的重要机械参数, 摆片上的阻尼孔和梳齿在刻蚀过程中几何尺寸变化较大, 会造成摆片质量变化, 若直接代入设计值或比设计值偏小的假定值, 估算其他机械参数得到的结果误差较大。为得到摆片的实际质量, 设计了基于加速度计开环频率响应试验和静态静电力试验的方法, 利用试验得到的加速度计开环频率响应曲线估计出摆片质量。

(1) 试验得到的摆片质量估算值与镜检法得到的结果一致, 该方法的试验结果能够达到一定的精度, 满足工程应用的要求。

(2) 开环频率响应试验是力平衡加速度计闭环调试过程中的必要试验, 因此该方法不需要特殊的设备和环境, 是一种简便而有效的测量方法。

参 考 文 献

- 1 Cimoo S, Byeoungju H, Sukhan L. Micromachined inertial sensors. In: Proceedings of 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Kyongju, South Korea, 1999, 2: 1 049~1 056
- 2 袁光, 丁衡高, 高钟毓, 等. 叉指式微加速度计的结构设计. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(11): 38~41
- 3 姚雅红, 高钟毓, 吕苗, 等. 采用薄片溶解工艺制造微机械惯性仪表的实验研究. 清华大学学报(自然科学版), 1998, 38(11): 12~15
- 4 徐毓娴, 李庆祥, 白立芬, 等. 微机械零件三维几何尺寸测量系统. 仪器仪表学报, 1996, 17(1): 319~321, 326

- 5 苑伟政, 王小伟, 马炳和. 微机械三维结构几何尺寸的图像测量. 西北工业大学学报, 2001, 19(4): 493~497
- 6 唐圣明, 陈思琴, 熊幸果. 硅传感器反应离子刻蚀的观察. 电子显微学报, 2000, 19(4): 583~584
- 7 高钟毓. 静电场耦合微机电系统的动态模型. 机械工程学报, 2001, 37(3): 97~101

STUDY ON ESTIMATION OF THE PROOF MASS OF A MEMS ACCELEROMETER

*Li Jiang Gao Zhongyu Dong Jingxin
(Tsinghua University)*

Abstract: The proof mass of a comb-finger MEMS accelerometer is an important mechanical parameter, which will affect the performance of the accelerometer greatly, so it is necessary to acquire the actual value of the proof mass. A method based on the open-loop frequency response experiment and the static electrostatic force experiment is investigated for this purpose. The equation set which contains the variable of the proof mass can be derived from the open-loop transfer function and the equation of the force balance. Then the actual value of the proof mass can be resolved from the equation set. The experimental results show that the actual value of the proof mass can be estimated with a high accuracy by this method. It is also a convenient and useful method to be used in the fieldwork without the special requirement of environment and costly facilities.

Key words: Micro electromechanical systems Accelerometer
Proof mass Mechanical parameters

作者简介: 李疆, 女, 1976 年出生, 博士研究生。主要从事微机械加速度计的研究。