

# 力平衡式微加速度计系统特性研究

张 扬, 曲延滨

(哈尔滨工业大学 (威海) 信息科学与工程学院, 山东 威海 264209)

**摘要:** 力平衡式微加速度计是目前硅微速度计领域研究的热点, 文章介绍了力平衡式加速度计的闭环检测原理, 通过对反馈方式、偏置电压极性等对加速度计性能影响的定性分析, 阐述了不同情况下提高加速度计性能所应采取的措施.

**关键词:** 力平衡; 微加速度计; 偏置电压极性

**中图分类号:** TP212.1

**文献标识码:** A

## Characteristics research on force balanced micro - accelerometer system

ZHANG Yang, QU Yan - bin

(College of Information Science and Engineering, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai, Shandong 264209, China)

**Abstract:** Force balanced micro - accelerometer is the hotspot in the field of silicon micro - acceleration transducers. In this paper, the principle of the closed - loop detection systems for force - balance micro - accelerometer is presented. The factors such as feedback mode and bias voltage polarity which affect the performance of micro - accelerometer are qualitative analysis. How to improve the performance of micro - accelerometer is also described.

**Keywords:** force balanced; micro - accelerometer; bias voltage polarity

电容式微加速度计具有精度高、噪声特性好、漂移低、温度敏感性小、功耗低、结构简单等优点, 在航空航天、导航制导、汽车安全等领域得到了广泛应用<sup>[1~2]</sup>. 按照控制系统中有无反馈, 电容式加速度传感器可分为开环式和闭环式. 开环式加速度计又称为简单加速度计或非力平衡式加速度计, 其结构简单、体积小、成本低, 但它的线性度、量程、稳定性都比较差. 随着技术的发展, 利用反馈控制技术与传感器技术相结合而形成的闭环力平衡式微机械加速度计系统已成为人们研究的热点<sup>[3~4]</sup>.

### 1 力平衡式加速度计闭环检测原理

力平衡式加速度计又称为闭环式加速度计, 它除了包括开环加速度计的惯性敏感部分、信号传感电路和放大输出电路外, 还包括调理控制电路即力矩反馈部分. 力矩反馈的作用是把所形成的电信号形成反馈电压产生反馈力加至敏感质量块来平衡敏感质量的惯性力, 反馈电压与位移信号成正比, 所生成的静电反馈力与位移信号也成正比, 而方向与惯性力相反, 当二力平衡时, 闭环回路的增益很大, 响应时间快, 敏感质量的位移趋于零. 而反馈力的大小代表了加速度的大小, 因此可以用反馈力的大小作为加速度的度量. 力平衡式加速度计闭环检测的原理如图 1 所示. 与开环电容式加速度传感器相比, 力平衡式加速度传感器能显著提高传感器的线性度、响应带宽、动态范围和测量精度.

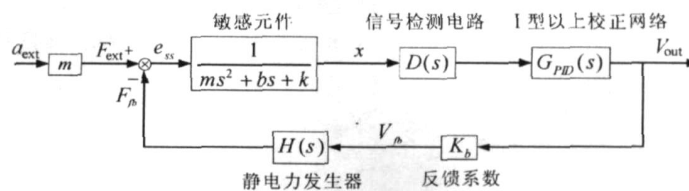


图 1 微加速度计闭环检测系统框图

Fig 1 Block diagram of the closed loop control system of micro - accelerometer

收稿日期: 2008 - 6 - 12

作者简介: 张 扬 (1975 - ), 男, 硕士, 讲师.

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2004AA4044210)

## 2 反馈方式对力平衡性能的影响

对于力平衡加速度传感器而言, 常见的力反馈方式有 2 种: 电压反馈到可动电极方式和电压反馈到固定电极方式.

### 2.1 电压反馈到可动电极方式

这种方式在差分电容器的两个极板上施加极性相反的调制电压, 将由与加速度产生的输出电压直接反馈到可动极板上, 造成两个极板之间存在电压差而形成平衡力矩, 平衡惯性力使得可动极板不发生移动. 图 2 为其简化模型, 中间极板为可动质量块, 加载反馈电压  $V_f$ ; 上下固定电极的调制电压由交流信号和直流信号构成, 分别为:  $V_a = V_0 + V_1 \sin t$ ,  $V_b = -V_0 - V_1 \sin t$  其中  $V_0$  称为偏置电压,  $V_1 \sin$  称为高频激励电压, 也称为调制信号. 根据平行极板间静电力公式  $F_e = AV^2/2d^2$ , 可求得作用在质量块上的静电力为:

$$F_e = F_{ea} - F_{eb} = \frac{A}{2} \left[ \left( \frac{V_0 + V_1 \sin t - V_f}{d_0 - x} \right)^2 - \left( \frac{-V_0 - V_1 \sin t - V_f}{d_0 + x} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中:  $\epsilon_0$  是介电常数,  $A$  为电容极板的面积,  $d_0$  为电容极板的起始间距,  $x$  是在外界加速度作用下敏感质量块产生的位移.

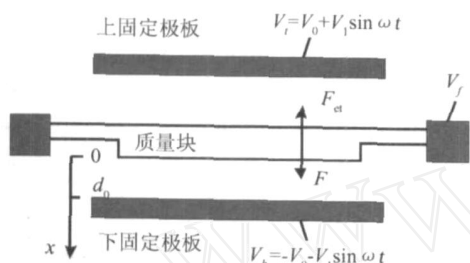


图 2 电压反馈到可动电极方式

Fig. 2 Voltage feedback to the movable plates

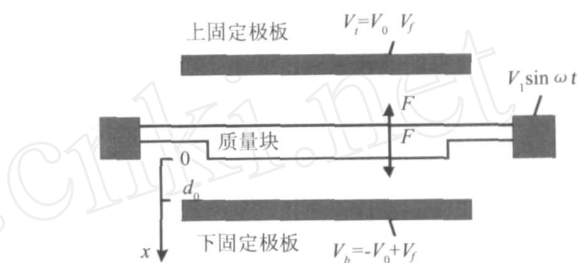


图 3 电压反馈到固定电极方式

Fig. 3 Voltage feedback to the immovable plates

### 2.2 电压反馈到固定电极方式

如果先在差分电容器两个极板上施加相同的偏置电压  $V_0$ , 保持可动极板处在平衡位置, 然后将反馈电压分别施加在两个差分极板上, 并且保持施加在这两个极板上的电压大小相等方向相反, 也能够形成良好的静电力反馈结构. 其简化模型如图 3 所示, 其中反馈电压为  $V_f$ , 质量块上的驱动电压为  $V_1 \sin t$ , 上下电极的反馈电压分别为  $-V_f$  和  $+V_f$ , 偏置电压为  $V_0$ . 与前面类似, 可求出作用在质量块上的静电力为:

$$F_e = F_{ea} - F_{eb} = \frac{A}{2} \left[ \left( \frac{V_0 - V_f - V_1 \sin t}{d_0 - x} \right)^2 - \left( \frac{V_0 + V_f - V_1 \sin t}{d_0 + x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

式 (2) 与式 (1) 的结构形式相同, 可以分析, 在驱动频率比被测信号频率和机械本征频率高很多情况下, 可这两种力反馈方式对质量块所受静电力对力平衡性能的影响是类似的.

比较两种反馈方式, 虽然电压反馈到固定电极的方式减弱了反馈对电容传感器输出信号的直接影响, 但是需要增加运算放大器来完成反馈电压和偏置电压的求和工作, 增加了硬件结构的复杂程度, 本研究只对电压反馈到可动电极的方式进行分析.

## 3 偏置电压极性对加速度计性能的影响

### 3.1 偏置电压极性对开环加速度计静电力的影响

当偏置电压为正 - 正配置时, 即  $V_a = V_0 + V_1 \sin t$ ,  $V_b = V_0 - V_1 \sin t$  根据静电力计算公式, 可计算出作用在开环加速度计可动极板上的静电力为:

$$F_e = F_{ea} - F_{eb} = \frac{A}{2} \left[ \left( \frac{V_0 + V_1 \sin t}{d_0 - x} \right)^2 - \left( \frac{V_0 - V_1 \sin t}{d_0 + x} \right)^2 \right] \quad (3)$$

令  $\tilde{x} = x/d_0$ , 对上式进行化简得:

$$F_e = \frac{2A}{d_0^2(1-\tilde{x}^2)^2} \left[ (V_0^2 + V_1^2 \sin^2 t) \tilde{x} + V_0 V_1 \sin t + \tilde{x}^2 V_0 V_1 \sin t \right] \quad (4)$$

若驱动频率比被测信号频率和机械本征频率高很多, 项  $V_0 V_1 \sin t + \tilde{x}^2 V_0 V_1 \sin t$  对敏感质量的作用力可以忽略不计, 则可以求出作用在敏感质量上的静电力的平均值为:

$$\bar{F}_e = \frac{2A\tilde{x}}{d_0^2(1-\tilde{x}^2)^2} \left[ V_0^2 + \frac{1}{2}V_1^2 \right] \quad (5)$$

同理, 可以求出当偏置电压为正-负配置、负-正配置以及负-负配置时, 作用在可动极板上的静电力, 与前面类似, 忽略高频项后, 其静电力的平均值均与式(5)相同。

若  $x \ll d_0$ , 对式(5)求解静电负刚度得:

$$K_{se} = \frac{\partial \bar{F}_e}{\partial x} = \frac{2A(d_0^2 + 3x^2)}{(d_0^2 - x^2)^3} \left[ V_0^2 + \frac{1}{2}V_1^2 \right] - \frac{2A}{d_0^3} \left[ V_0^2 + \frac{1}{2}V_1^2 \right] \quad (6)$$

由式(5)、(6)可以看出, 对于开环电容加速度计, 所施加的偏置电压无论极性如何, 对敏感质量产生的静电力平均值都是一样的. 在较小的  $\tilde{x}$  时, 驱动电压对运动极板产生的作用力随着  $\tilde{x}$  的增大而增大, 即静电力对运动极板产生了正反馈效应, 从而使惯性表头的可靠工作范围降低, 导致吸附效应. 但也应该看到, 正是由于正反馈, 使惯性表头的有效刚度系数降低, 使其灵敏度增加了.

### 3.2 偏置电压极性对力平衡式加速度计的影响<sup>[5]</sup>

#### 3.2.1 偏置电压为正-正配置

当偏置电压为正-正配置时,  $V_i = V_0 + V_1 \sin t - V_f$ ,  $V_b = V_0 - V_1 \sin t - V_f$ , 通过计算得出作用在质量块上的静电力与式(2)相同. 对式(2)进行化简后并忽略高频项后, 可以求出作用在敏感质量上的平均静电力等效为:

$$\bar{F}_e = \frac{2A\tilde{x}}{d_0^2(1-\tilde{x}^2)^2} \left[ (V_0 - V_f)^2 + \frac{1}{2}V_1^2 \right] \quad (7)$$

当  $x \ll d_0$  时, 对式(7)求解静电负刚度为:

$$K_{se} = \frac{\partial \bar{F}_e}{\partial x} = \frac{2A(d_0^2 + 3x^2)}{d_0^4(1-\tilde{x}^2)^3} \left[ (V_0 - V_f)^2 + \frac{1}{2}V_1^2 \right] - \frac{2A}{d_0^3} \left[ (V_0 - V_f)^2 + \frac{1}{2}V_1^2 \right] \quad (8)$$

式(8)与式(6)比较, 反馈电压引入后减小了由偏置电压引起的静电力, 反馈电压越大, 极板产生的静电引力就越小. 随着反馈电压的增大, 产生的静电负刚度越来越小, 从而使得系统的刚度减小得就减少, 进而使得系统越趋于稳定, 由此可见反馈电压带来的是一种负反馈效应.

#### 3.2.2 偏置电压为正-负配置

当偏置电压为正-负配置时,  $V_i = V_0 + V_1 \sin t - V_f$ ,  $V_b = -V_0 - V_1 \sin t - V_f$ , 同样可以求出静电负刚度为:

$$K_{se} = \frac{\partial \bar{F}_e}{\partial x} = \frac{8dAV_0V_f}{d_0^3} x \quad (9)$$

当  $\tilde{x} \ll 1$  时, 把式(9)同式(8)相比, 此时的刚度与挠性梁的刚度方向相同, 说明反馈电压引入系统后加强了系统总刚度, 引入的是一种性能更好的负反馈, 可以依靠该静电力来平衡系统所受的惯性力. 负反馈系数越大, 产生的反馈电压也就越大, 产生的反方向的静电引力也就越大, 系统的总刚度也就越大, 因而系统的量程也就越大, 稳定性也就越好.

#### 3.2.3 偏置电压为负-正配置

当偏置电压为负-正配置时, 类似地可以求出其静电力平均值和相应的静电负刚度. 当  $\tilde{x} \ll 1$  时, 此时的静电平均引力随着反馈电压的引入而进一步得到加强, 产生的静电刚度也越来越大, 相当于系统引

入了正反馈,而随着反馈电压的增大,静电引力和静电负刚度越来越大,使得系统越来越不稳定。

### 3.2.4 偏置电压为负 - 负配置

当偏置电压为负 - 负配置时,求出其静电力平均值和相应的静电负刚度后分析比较可知,和偏置电压为负 - 正配置一样,此时的系统相当于引入了正反馈,随着反馈电压的增大,静电引力和静电负刚度越来越大,使得系统越来越不稳定。

综合上述分析,对力平衡式加速度计,若偏置电压为正 - 负或正 - 正配置时,反馈电压引起的是负反馈。当反馈足够大时,由驱动信号引起的吸合效应基本被消除,器件有很好的线性度,但是由于负反馈使传感器系统的有效刚度系数增加,所以传感器灵敏度会减小。

若偏置电压为负 - 负或负 - 正配置,反馈电压引起的是正反馈。随着反馈系数的增加,将会使传感器的有效刚度系数、量程和线性度减小,这虽然能增大传感器的灵敏度,但器件的可靠工作范围降低。当反馈系数达到一定数值时,即使没有加速度输入信号,质量块也很容易被吸附。

## 4 结语

微加速度计输出信号微弱,而且分立元件电路噪声大,闭环反馈原理提供了一种使可动质量块始终处于靠近中心平衡位置的方法,这使得质量块的位移能控制在一个相对较小的范围之内,提高了加速度计的检测范围和稳定性。本文对力平衡微加速度计的原理以及反馈方式、偏置电压极性 etc 对加速度计性能的影响进行了初步分析,为以后的进一步研究打下基础。

### 参考文献:

- [1] Julian W G, Vijay K V, Osama O A. 微传感器、微机电系统和灵巧器件 [M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [2] Stephen D S. 微系统设计 [M]. 刘泽文,王晓红,黄庆安,等译. 北京:电子工业出版社, 2004.
- [3] 张旭. 一种力平衡式隧道加速度传感器的特性研制 [J]. 电子器件, 2001, 24(4): 295 - 300.
- [4] Kraft M, Lewis C P, Hesketh T G. Closed - loop silicon accelerometers [J]. IEEE Proc Circuits Devices Syst, 1998, 145(5): 325 - 331.
- [5] 董林玺. 微机械电容式传感器及其相关特性研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2004.

(责任编辑:沈芸)