

Synthetic Analysis of Noise in Capacitive Micro-Accelerometer \*

WANG Yi-hua, LI Xiaoying \*, JIANG Qing-hua

(Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract :** The noises for capacitive micro-accelerometer are the main obstacle to improving its performance. This paper analyzes the noise characteristics of capacitive micro-accelerometer. The noise sources are modeled as mechanical and electrical parts, and of their values in the system are both analyzed and calculated by the theory of thermodynamics equilibrium and the characteristic of integrate circuit noise. From analyzing the result of experiments by capacitive micro-accelerometer which is designed of our own, the charge amplifier noise is the main noise source. The model of noise and conclusion are validated by experiments.

**Key words :** MEMS; capacitive micro-accelerometer; noise; charge amplifier

**EEACC :** 2575D; 7230M

电容式微加速度计的噪声分析 \*

王一桦, 李晓莹 \*, 蒋庆华

(西北工业大学陕西省微/纳米系统重点实验室, 西安 710072)

**摘 要 :** 噪声是以微弱信号处理为特征的电容式微加速度计性能提高的主要制约因素。针对电容式微加速度计的噪声, 详细分析和研究了其特性。首先分析了电容式微加速度计的系统噪声由机械热噪声和电路噪声两部分组成; 采用热力学均分理论和集成电路噪声特性分别对机械热噪声和电路噪声进行建模、分析和计算, 得到了机械热噪声等效噪声加速度和各级电路的噪声值。然后用自行设计的微加速度计表头和接口电路进行试验, 实验结果验证了噪声模型的正确性, 确认了电容式微加速度计电容检测电路—电荷放大器是最主要的噪声源。

**关键词 :** MEMS; 电容式微加速度计; 噪声; 电荷放大器

**中图分类号 :** TP212.1

**文献标识码 :** A

**文章编号 :** 1004-1699(2008)04-0648-04

微机械加速度计 (Micromechanical Accelerometers, 简称 MMA) 是利用检测质量的惯性力来测量所受加速度的仪表, 是一种重要的力学量传感器, 是最早研究的微机械惯性传感器之一。应用新兴的微机械加工技术制作的微加速度计, 具有体积小、重量轻、低功耗等诸多优点, 应用前景非常广阔。但是目前微加速度计普遍存在信噪比较低, 灵敏度不高, 量程范围小等缺点, 其主要原因是系统内部存在较大的噪声, 分立元件电路中的干扰与噪声使得有用的输出信号完全淹没在噪声之中, 而且有用输出信号的频谱与低频噪声的频谱是重叠的。因此本文通过对电容式微加速度计的各种噪声建模分析, 为提高微加速度计的性能奠定基础。

1 电容式加速度计工作原理

1.1 基本组成

电容式微加速度计的组成如图 1 所示, 包括: 振动质量块、差分电容器  $C_a$ 、 $C_b$  和外围接口电路。

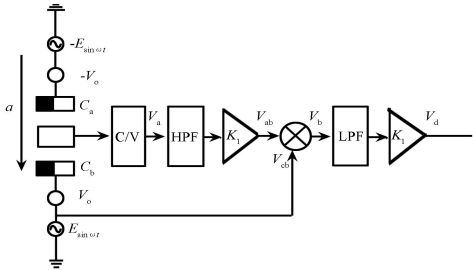


图 1 电容式微加速度计的组成

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (50505038)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2008-02-26

图 1 中  $a$  为作用在加速度计敏感轴上的待测加速度;  $C_a$ 、 $C_b$  为由上极板、下极板与振动质量块  $M$  组成的差分电容器;  $V_o$  是加在上下极板的偏置电压;  $E\sin t$  是加在上下极板的载波信号<sup>[1]</sup>。

1.2 工作原理

加速度  $a$  作用在电容式微加速度计上, 振动质量块在惯性力作用下上下运动, 导致与上下极板的距离不相等, 从而使  $C_1 \neq C_2$ ; 振动质量块与上下极板的  $C$  经过电容检测电路转换为相应的电压值  $V_a$ 。  $V_a$  的计算公式为

$$V_a = \frac{m d_0^2 a}{2 A V_0}$$

(1)

其中  $a$  为输入加速度;  $V_o$  为加在左右极板上的偏置电压,  $A$  为极板面积,  $d_0$  为极间间隙,  $\epsilon$  为介电常数,  $m$  为质量块  $M$  的质量。由式 1 可知, 加速度与反馈电压成正比, 由检测到的电压  $V_d$  即可得加速度  $a$  的大小。

2 电容式微加速度计噪声建模

电容式微加速度计的系统噪声主要包括机械热噪声和电路噪声。本文对电容式微加速度计系统的机械热噪声和电路噪声分别进行了建模和分析。

2.1 机械热噪声

对于微加速度计表头而言, 在其质量块周围分布着大量的气体分子, 而气体分子的布朗运动会引起机械热噪声<sup>[2-5]</sup>。根据热力学均分理论, 电容式微加速度计的力噪声谱密度和加速度谱密度分别为<sup>[6-7]</sup>:

$$F_n^2 = 4 K_B T f_z B$$

(2)

$$a_n^2 = \frac{4 K_B T f_z B}{m^2}$$

(3)

质量块的质量为  $m$ , 机械阻尼为  $f_z$ , 挠动力为  $F_n$ ,  $K_B$  为波耳兹曼常数,  $T$  为热力学温度,  $B$  为带宽。

由此可知, 机械热噪声的大小主要取决于温度和机械阻尼的大小。因此减小阻尼, 降低环境温度和增大表头的敏感质量都可以有效减小机械热噪声。

2.2 电路噪声

电容式微加速度计电路的噪声源包括热噪声、散粒噪声和  $1/f$  噪声<sup>[8]</sup>。

1) 热噪声

电路中的热噪声主要是由电阻元件引起的。电阻的热噪声起源于电阻中电子的随机热运动, 导致电阻两端电荷的瞬时堆积, 形成噪声电压。即使电阻没有连接到任何信号源或电源, 也没有任何电流流过该电阻, 该电阻也会产生热噪声。

电阻  $R$  两端的开路热噪声电压有效值  $E_t$  可由式(4) 计算

$$E_t = \sqrt{4 K_B T R B}$$

(4)

$K_B$  为波耳兹曼常数,  $T$  为热力学温度,  $R$  为电阻值,  $B$  为电路带宽。

2) 散粒噪声

散粒噪声起源于越过插入电荷流中的势垒的电荷数量的随机起伏。散粒噪声电流的有效值为式(5)

$$I_{Sh} = \sqrt{2 q I_{dc} B}$$

(5)

式中,  $q = 1.602 \times 10^{-18} C$  是电子电荷,  $I_{dc}$  是平均直流电流,  $B$  为噪声带宽。

3)  $1/f$  噪声

$1/f$  噪声又称为低频噪声是由两种导体的接触点电导的随机涨落引起的, 它存在于所有的有元器件和某些无源器件中。为了尽可能消除  $1/f$  噪声, 可以通过利用高频载波信号来调制输出信号。

图 2 是场效应管(FET) 的噪声特性频率分布图, FET 的噪声分为电压噪声和电流噪声两个部分。

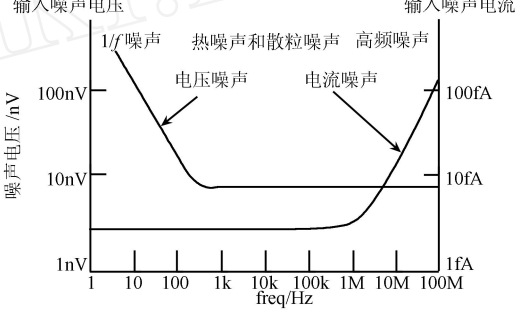


图 2 FET 噪声 VS 频率

图 2 表明了各类噪声与频率变化的关系。当信号频率在  $1\text{ kHz} \sim 1\text{ MHz}$  内, 电路的电压噪声和电流噪声最小并且是恒定的, 所以本文中电容式微加速度计电路选用的载波信号频率在这个频率段内, 这样能够使有用信号远离低频电压噪声( $1/f$  噪声)和低频电流噪声(散粒噪声)。

4) Op-Amp 噪声

运算放大器在电容式微加速度计电路中被大量采用, 因此它的噪声分析也显得非常重要。运算放大器的噪声可以用三个噪声源来表示: 一个电压源  $e_n$  和两个分别为  $i_{n1}$  和  $i_{n2}$  的电流源。反相放大电路的噪声简化模型如图 3, 噪声计算公式为(6)

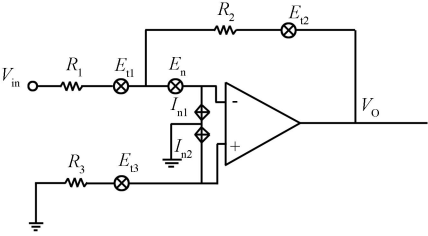


图 3 反相放大电路噪声模型

$$E_{no}^2 = \left(1 + \frac{R_2}{R_s}\right)^2 (E_n^2 + E_{is}^2 + I_{n2}^2 R_s^2) + \left(\frac{R_2}{R_s}\right)^2 E_{n1}^2 + E_{n2}^2 + I_{n1}^2 R_2^2 \tag{6}$$

除了基本的放大电路,电容式微加速度计电路的第一级是电荷放大器,把电容信号转化为电压信号。电荷放大器的噪声模型如图 4,噪声计算公式为(7)。

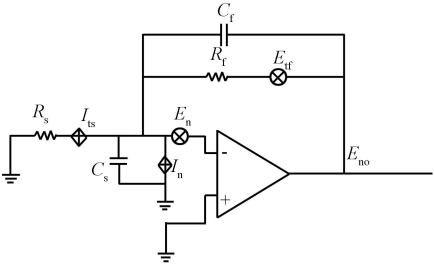


图 4 电荷放大器电路噪声模型

$$E_{no}^2 = E_n^2 \left(\frac{C_s + C_f}{C_f}\right)^2 \left[ f_H - f_L + f_{\omega} \ln \frac{f_H^2}{f_L^2 + f_o^2} \right] + f_o (4 K_B T R_f + I_{n2}^2 R_f^2 + I_{n1}^2 R_f^2) \left[ \tan^{-1} \frac{f_H}{f_o} - \tan^{-1} \frac{f_L}{f_o} \right] \tag{7}$$

上式中,  $f_H$  和  $f_L$  是电路的高低截止频率,  $f_{\omega}$  是运放的电压噪声转折频率,而  $f_o = 1/2 R_f C_f$ 。

2.3 噪声计算

按照设计的电容式微加速度计的参数:利用式(1)和式(3)计算得到机械热噪声等效噪声电压:

$$E_{na} = 2.35 \times 10^{-7} \text{ V}$$

利用式(6),(7)代入设计值计算得到,放大电路噪声值  $E_{no} = 2.15 \times 10^{-7} \text{ V}$ ;电荷放大器噪声值  $E_{no} = 1.05 \times 10^{-6} \text{ V}$ 。

比较计算结果,电荷放大器的噪声远大于机械热噪声和放大电路的噪声。本文对电容式微加速度计噪声分析的结果表明,其噪声主要来源于第一级电路电荷放大器,其他的电路单元噪声可以忽略不计。

3 实验结果分析

为了验证微加速度计噪声分析的正确性,使用自行设计的微加速度计表头和接口电路(图 5)对微加速度计输出信号的噪声进行测试。

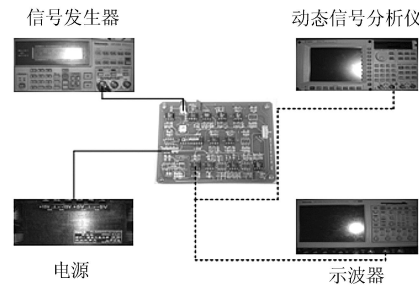


图 5 噪声测试试验

电容式微加速度计噪声的测试包括三个测试点:未安装加速度计表头的电荷放大器输出信号测试点、安装加速度计表头的电荷放大器输出信号测试点、高通电路输出信号测试点。利用动态信号分析仪 35670A 分别在三个测试点测量噪声的频谱。

由图 6 可以看出,未安装加速度计表头的电荷放大器输出信号噪声在几百 nV 附近,和计算数值在一个数量级上。

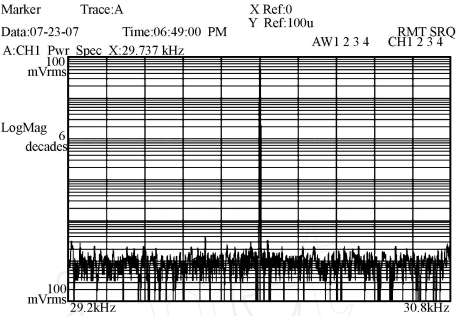


图 6 未安装加速度计表头的电荷放大器输出噪声频谱

图 7 表明,电荷放大器输出信号噪声在几  $\mu\text{V}$  附近,和计算数值在一个数量级上。

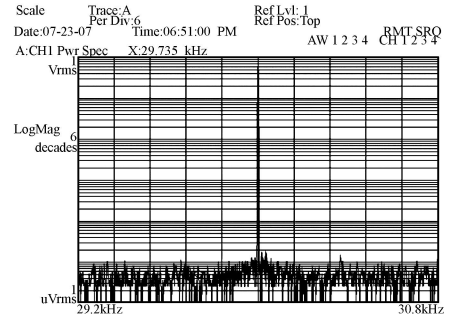


图 7 安装加速度计表头的电荷放大器输出信号噪声频谱

图 8 表明,高通电路输出信号噪声也在几  $\mu\text{V}$  附近,和电荷放大器输出信号噪声大致相同。这表明电荷放大器是电容式微加速度计噪声的最主要来源。

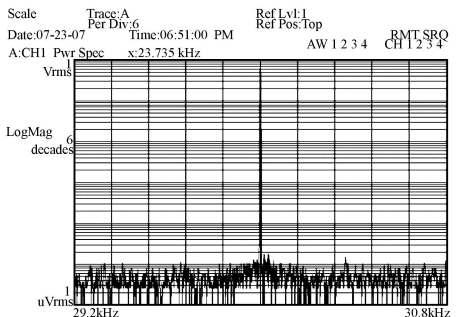


图 8 高通电路输出信号噪声频谱

4 结论

本文建立的微加速度计噪声模型能够简单、有效、准确地计算出电容式微加速度计的各种噪声。

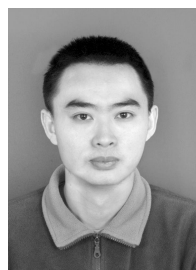
通过对机械噪声和电路噪声的比较可知,电路噪声远大于机械噪声。而电荷放大器是电路噪声的最主要来源,其他电路单元输出信号噪声和电荷放大器输出信号噪声相比可以忽略不计。这对降低电容式微加速度计的噪声,提高其性能具有指导意义。该噪声建模和分析的方法还可应用于其他微惯性器件。

#### 参考文献:

- [1] 吴学忠,肖定邦,李圣怡. 电容式微加速度计闭环检测技术研究. 传感技术学报,2006,19(4),1097-1099.
- [2] Van Kampen R P. Bulk-micromachined Capacitive Servo-Accelerometer[D]. Netherland: Technische. Univ. Delft, C28 Sep 95,1995.
- [3] Woo Seong Che, Jun Ho Oh. Development of Force Balance

Accelerometer with High Accuracy for Precision Motion Measurement[J]. Meas. Sci. Technol.,1996,(7):1001-1011.

- [4] Kraft M, Lewis C P, Hesketh T G. Closed 2 loop Silicon Accelerometers[J]. IEE Proc Circuits Devices Syst.,1998,145(5):325-331.
- [5] Ebrahim Abbaspour-Sani, Ruey-Shing Huang, Chee Yee Kwok. A Linear Electromagnetic Accelerometer[J]. Sensors and Actuators A,1994,44:103-109.
- [6] Thomas B, Gabrielson. Mechanical-Thermal Noise in Micromachined Acoustic and Vibration Sensors[J]. IEEE Transactions on Electron Devices,1993,40(5):903-909.
- [7] Keiji Jono, Kazuyuki Minami, Masayoshi Esashi. An Electrostatic Servo-Type Three-Axis Silicon Accelerometer [J]. Meas. Sci. Technol,1995,(6):11-15.
- [8] 董景新. 微惯性仪表-微机械加速度计[M]. 北京:清华大学出版社,2003.



王一桦(1983-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要从事 MEMS 惯性传感器及微弱信号检测的研究,automyhead@126.com.



李晓莹(1968-),女,西北工业大学副教授,主要从事精密测试计算、微机电系统研究,xiaoy@nwpu.edu.cn.