

文章编号 1004-924X(1999)04-0059-06

电容式微加速度计结构的建模及仿真

周 华 沈连官 尤 辉 李川奇

(中国科技大学精密机械与精密仪器系 合肥 230027)

摘 要 建立了电容式微加速度计的结构模型,运用有限元分析方法对其进行模态分析,研究了微加速度计结构尺寸对谐振频率和模态振型的影响,得出了结构尺寸对这两者的影响规律,为此类加速度计的结构设计提供了依据。

关键词 电容式微加速度计 有限元分析 模态分析

中图分类号 O242.21 **文献标识码** A

1 引 言

近十年来,随着集成电路制备技术和微机械技术的发展,微型加速度计已经广泛应用于宇航、汽车工业等众多的科研及民用领域。力平衡式微加速度计具有高精度、良好线性度和稳定性等特点,因此引起了研究人员的高度兴趣。力平衡式加速度计的结构通常采用电容式,当加速度作用在振子上,振子偏转使电容发生变化。通过检测输出信号量,同时由电容器电极提供静电力进行平衡,以测得加速度的大小。

由于微加速度计的高度集成化、结构尺寸小以及加工工艺对结构的限制,使得其设计成为一项复杂的任务。本论文利用有限元分析软件 I-DEAS 建立微加速度计的结构模型,采用有限元方法对其结构进行模态分析,得出了微加速度计结构尺寸对其谐振频率及模态振型的影响规律。

2 有限元模态分析和 GuYan 算法

2.1 有限元模态分析

近年来由于电子计算机的应用和计算方法的新进展,有限元分析方法已被广泛用于工程领域。原则上,随着划分网格的加密或近似函数阶次的提高,有限元方法求解的工程数值将收

敛于精确解。有限元模态分析通常用来计算系统的固有谐振频率和模态振型。模态分析方法的实质是一种坐标转换,其目的在于把原在物理坐标系中描述的响应向量转换到“模态坐标系”中来描述。这一坐标系的每一个基向量恰是振动系统的一个特征向量。采用模态坐标的好处是:利用各特征向量之间的正交特性,使描述响应向量的各个坐标相互独立而无耦合。

采用有限元方法,将结构离散化的系统运动方程可表示为:

$$[M] \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{du}{dt} \right\} + [K] \{u\} = \{R\} \quad (1)$$

式中 $[K]$ 是总体刚度矩阵, $[M]$ 是总体质量矩阵, $[C]$ 是阻尼矩阵, $\{u\}$ 是节点的位移矩阵, $\{R\}$ 是载荷矩阵。

假设全部节点有 N 个自由度,按自由振动理论上式有 N 个固有频率 ω_k 。

对结构进行模态分析,令干扰为 $\{R\} = [0]$,阻尼 $[C] = [0]$,假设物体作简谐振动,则有

$$\{u\} = \{u_k\} \sin \omega_k t \quad (k = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式,得到: $[[K] - \omega_k^2 [M]] \{u_k\} = 0$

ω_k 由式 $|[K] - \omega_k^2 [M]| = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, N)$ 所决定。

利用解特征值的计算方法就可求出特征值 ω_k , ω_k 即物体自由振动的固有频率。

对于任一阶固有频率 ω_k ,由式(2)都能确定一组非零解,它表明结构的每个节点位移都是一种振幅不变的谐振动, $\{u_k\}$ 为 k 阶振幅列阵,称为式(1)的 k 阶特征向量或系统的 k 阶模态。

2.2 GuYan 主自由度缩减法

本研究求解特征值的计算方法是采用 GuYan 主自由度缩减法。GuYan 算法源于主从自由度法,在此方法中将位移向量 $\{u\}$ 分为 $\{u_m\}$ 和 $\{u_s\}$ 两部分,并假设 $\{u_s\}$ 按照一种确定的方式依赖于 $\{u_m\}$,因此, $\{u_m\}$ 称为主自由度,而 $\{u_s\}$ 称为从自由度, $\{u_s\}$ 可由 $\{u_m\}$ 表示如下: $\{u_s\} = [T] \{u_m\}$ (3)

$$\text{则有: } \{u\} = \begin{bmatrix} [I] \\ [T] \end{bmatrix} \{u_m\} = [G] \{u_m\} \quad (4)$$

式中矩阵 $[T]$ 规定了 $\{u_s\}$ 和 $\{u_m\}$ 之间的依赖关系, $[G] = \begin{bmatrix} [I] \\ [T] \end{bmatrix}$

对于无阻尼的自由振动方程:

$$[K] \{u\} + [M] \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} \right\} = 0 \quad (5)$$

利用关系式(4)缩减其自由度系数将式(4)代入(5),前乘 $[G]^T$ 得到:

$$[K]^* \{u_m\} + [M]^* \left\{ \frac{d^2 u_m}{dt^2} \right\} = 0, \text{ 式中 } [K]^* = [G]^T [K] [G], [M]^* = [G]^T [M] [G]$$

显然,经过主自由度缩减后可大大降低计算的阶次。为确定 $\{u_m\}$ 和 $\{u_s\}$ 的关系,采用静力凝聚的方法,将自由振动方程(4)重新分块写为:

$$\begin{bmatrix} [M_{mm}] & [M_{ms}] \\ [M_{sm}] & [M_{ss}] \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \frac{d^2 u_m}{dt^2} \\ \frac{d^2 u_s}{dt^2} \end{array} \right\} + \begin{bmatrix} [K_{mm}] & [K_{ms}] \\ [K_{sm}] & [K_{ss}] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_m \\ u_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

考虑静力凝聚, 有: $[M_{ms}] \approx [0], [M_{sm}] \approx [0], [M_{ss}] \approx [0]$

将上述三式代入式(6)后, 由第二平衡式得到: $[K_{sm}]\{u_m\} + [K_{ss}]\{u_s\} = 0$

则: $\{u_s\} = -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]\{u_m\}$ (7)

比较式(3)和式(7)可知[T]的表达式为: $[T] = -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]$

3 结构设计及分析

电容式加速度计本身是一个质量-弹性梁系统, 在外界加速度作用下振子发生振动, 所以频响范围是加速度计的一个重要特性, 在结构设计时应使系统的频响范围足够宽。结构的谐振频率是影响频响范围的重要因素。

本文建立的加速度计基本结构模型如 Fig. 1 所示, 它采用双悬臂梁质量-弹性梁系统结构。活动的振子用来感受外界加速度作用, 同时它还作为差分式电容器的活动电极。

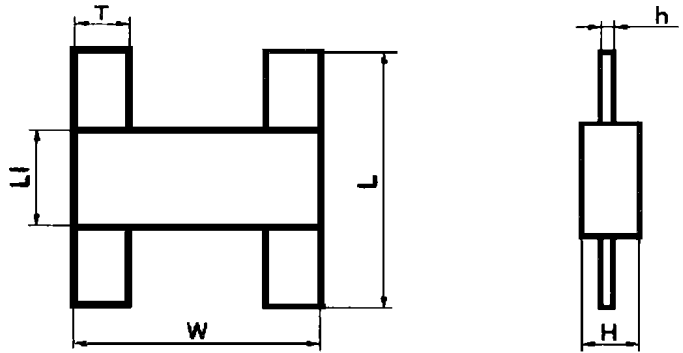
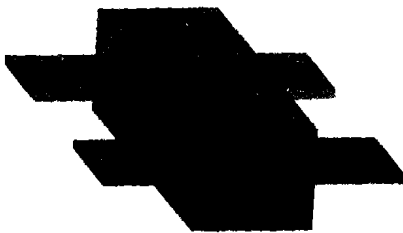
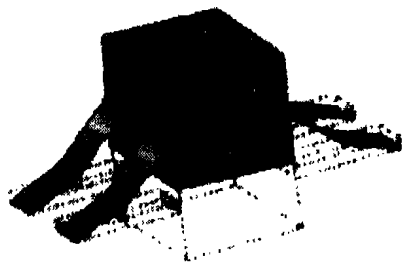
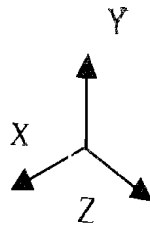


Fig. 1 Diagram of cantilever structure of capacitive accelerometer

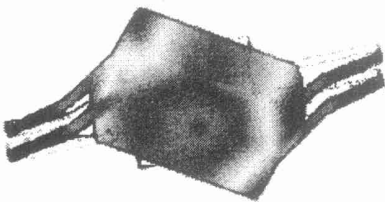
3.1 结构的模态振型



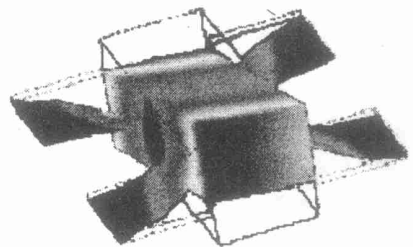
(a) Diagram of cantilever structure



(b) Fundamental mode of structure (excitation mode)



(c) Second mode of structure (swing mode)



(d) Third mode of structure (rocking mode)

Fig. 2 Mode of the cantilever structure of capacitive micro accelerometer

该分析模型的材质为 Ni, 取结构参数: $L = 800\mu\text{m}$ 、 $L_1 = 300\mu\text{m}$ 、 $W = 900\mu\text{m}$ 、 $T = 275\mu\text{m}$, 振子的厚度是 $H = 200\mu\text{m}$, 悬臂梁的厚度是 $h = 5\mu\text{m}$ 。利用 I-DEAS 软件中有限元模态分析的方法计算的结构模态振型如图 2 所示。(a) 为振子的基本结构, (b) 为加速度计结构的第一阶振型, 即激励振型。在外界加速度激励下振子沿 Z 轴的振动。(c) 为结构的第二阶振型, 振子绕 X 轴的摆动。(d) 为结构的第三阶振型, 振子绕 Y 轴的扭振。与这三阶振型对应的谐振频率分别为: 4150Hz, 5930Hz, 6020Hz。

3.2 影响振型的因素

对不同厚度振子的结构振型计算表明, 改变振子厚度方向尺寸对振型会有影响, 即振型的阶次会变化。如表 1 所示, 在支撑梁结构尺寸不变的情况下, 当振子的厚度 $H \geq 350\mu\text{m}$ 时, 结构的摆动振型将成为第一阶振型, 而激励振型成为第二阶振型。这表明在外界激励下, 振子在低频阶段先发生摆动, 显然这不利于加速度计的正常测量。

Table 1 Frequency and mode of different structure dimension

Structure Dimension (unit: μm)		Frequency and mode (unit: Hz)		
		f_1	f_2	f_3
	$h = 5$	2778.0 (exciting)	3595.5 (rocking)	4980.9 (swing)
$H = 5$	$h = 100$	6234.3 (exciting)	8832.1 (swing)	9299.3 (rocking)
$L = 800$	$h = 200$	4146.6 (exciting)	5225.9 (swing)	6017.8 (rocking)
$L_1 = 200$	$h = 300$	3507.9 (exciting)	4161.1 (swing)	4740.4 (rocking)
$T = 275$	$h = 350$	3086.6 (swing)	3287.6 (exciting)	4240.1 (rocking)
	$h = 400$	2854.7 (swing)	3095.9 (exciting)	3889.2 (rocking)

3.3 结构尺寸对谐振频率的影响

结构的谐振频率与悬臂梁长度和厚度的关系曲线图分别如图 3、图 4 所示。

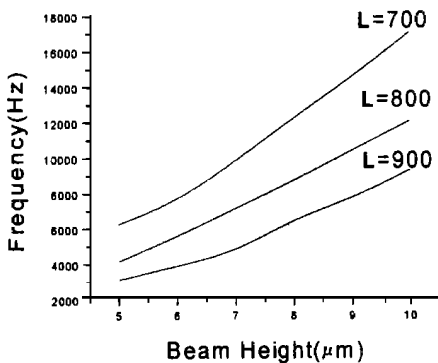


Fig. 3 Frequency as the function of beam height

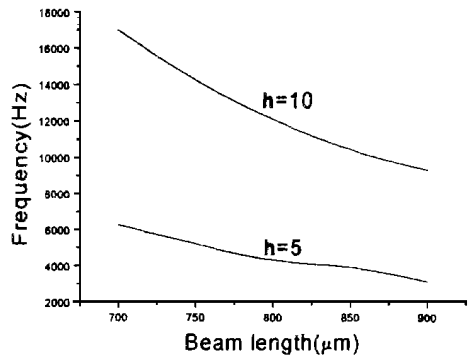


Fig. 4 Frequency as the function of beam length

由图 3, 图 4 可知, 对于双悬臂梁结构的加速度计, 其谐振频率 f 随悬臂梁厚度 h 的增大而增大, 随悬臂梁长度 L 的增加而减小, 都呈非线性关系。从图中我们还可以看出, 悬臂梁的厚度 h 对谐振频率影响显著, 厚度略微增加频率改变就很大。

4 模态分析计算的误差分析

结构几何建模时,模型本身是精确的,不存在简化误差。结构离散时,悬臂梁采用三节点板单元,振子采用四节点实体单元。计算精度取决于单元大小,以及静力凝聚时所选取的主自由度数目。单元划分越小,主自由度选取越多则计算精度就越高。在用 GuYan 算法时,主自由度数目的选取受系统软件的限制。如表 2 所示,选取的主自由度数目均为 78,当单元数相同时改变主自由度布局,计算得到的谐振频率有一定的差别,当单元数增加时这种差别就变小。这表明只要单元划分足够小,就能得到足够高的计算精度。

Table 2 Frequency with different Amount of Elements and Master DOF

Amount of Elements	Frequency (unit: Hz)		
	f_1	f_2	f_3
803	4097.6	5499.1	5848.7
	3971.0	5284.1	6089.9
	4222.2	5442.2	6119.6
1818	4461.9	5795.1	6472.4
	4392.7	5735.0	6398.6
	4437.8	5693.4	6352.8

5 结 论

本文采用有限元法对电容式微加速度计的结构进行了模态分析,计算了结构的谐振频率和模态振型,讨论了微加速度计结构尺寸对这两者的影响。从模态振型的分析可知,加速度计结构尺寸对其振型有影响。在进行加速度计结构设计时,结构尺寸的选取应使其第一阶振型为激励振型。而加速度计谐振频率的大小受悬臂梁厚度 h 的影响最大,厚度略微增加谐振频率就改变很大。另外我们还能看到,谐振频率随振子尺寸、悬臂梁长度的变化都呈非线性关系。

作者还利用有限元分析软件 ANSYS 对该基本模型进行了计算,采用的算法为 Subspace algorithm。两种算法的计算结果如表 3 所示。本文的计算结果表明, I-DEAS、ANSYS 软件这些用于宏观结构设计、分析的软件同样适合于微观结构的设计,这对于微机械电子系统的分析、设计具有重要意义。

Table 3 Solution result using I DEAS and ANSYS

Method	Frequency (unit: Hz)		
	f_1	f_2	f_3
GuYan algorithm			
By I DEAS	4150 (excit ing)	5930(swing)	6020(rocking)
Subspace algorithm			
By ANSYS	4394.1 (excit ing)	5902.4(swing)	5991.3(rocking)

参 考 文 献

- 1 Haronian Dan. Maximizing microelectromechanical sensor and actuator sensitivity by optimizing geometry. *Sensors and Actuators A*, 1995, (50): 223236
- 2 Ansel Y, et al. Mode coupling aspects in a vibrating gyroscope. *Sensors and Actuators A*, 1997, (62): 576581
- 3 Qiang Zou, et al. Structure design and fabrication of symmetric force-balance micromachining capacitive accelerometer. 1997, 3223: 284293
- 4 李德葆编著. 振动模态分析及其应用. 北京: 宇航出版社, 1993
- 5 FDEAS Master Series. SDRC, 1994
- 6 FDEAS Solid Modeling. SDRC, 1990

Structure Design and Simulation of Capacitive Micro accelerometer

ZHOU Hua, SHEN Lian-Guan, YOU Hui, LI Chuan-Qi
(Dept. of Precision Machinery & Precision Instrumentation,
University of Science & Technology of China, Hefei 230027)

Abstract

A solid modeling of capacitive micro-accelerometer structure is described. The mode analysis by means of the Finite Element Method is presented. The influence of accelerometer structural dimension on the resonance frequency and structural mode is investigated, which offers reliable basis for the structure design of micro-accelerator.

Key words: Capacitive micro-accelerometer, FEM, Mode analysis

周 华 男, 1973 年生。中国科学技术大学精密机械与精密仪器系硕士研究生。主要从事微传感器、微电子机械系统的 CAD 研究。