

加速度地震检波器简谐振子有限元分析

恩 德, 邓三星, 孙 攀, 陈亚柯, 张宁波

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454001)

摘 要:介绍简谐振子的工作原理。利用 ANSYS 软件, 采用有限元法创建了简谐振子质量块的实体模型, 选择单晶硅作为简谐振子中质量块的材料; 设置了模型的材料属性, 采用智能分网的方式对模型划分网格, 并对质量块模型施加沿 x 轴水平方向载荷, 进行三维的静力分析和模态分析。静力分析得到实体模型的总位移是 $0.236 \times 10^{-10} \mu\text{m}$; 模态分析时只对前四阶模型进行了分析, 根据其振型图及其总位移的应力云图, 得到实体模型的二十阶振动模态的频率是 78 001 Hz, 二十阶的总位移是 $0.122 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 。

关键词:微光机电系统(MOEMS)三分量加速度地震检波装置; 简谐振子; 质量块; 有限元; 位移

中图分类号:TN256

文献标识码:A

Finite Element Analysis for Harmonic Oscillator of Acceleration Seismic Geophone

EN De, DENG Sanxing, SUN Pan, CHEN Yake, ZHANG Ningbo

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454001, China)

Abstract: The working principle of the harmonic oscillator is introduced. Using the soft of ANSYS, the solid model of harmonic oscillator mass is created by adopting the finite element method. Single crystal silicon is chosen as the material of mass of harmonic oscillator. The material attributes of modal is set and the modal is meshed by ways of smart meshing. Then a horizontal load is applied along with the X axis for the static analysis and modal analysis. The total displacement of physical model by static analysis is $0.236 \times 10^{-10} \mu\text{m}$. Only the fourth-order of modal is analyzed by modal analysis. According to the vibration mode and the stress nephogram of total displacement, the twentieth-order vibration mode frequency of physical models is 78 001 Hz and the total displacement is $0.122 \times 10^{-6} \mu\text{m}$.

Key words: MOEMS three-component acceleration seismic geophone; harmonic oscillator; mass; finite element; displacement

0 引言

微光机电系统(MOEMS)三分量加速度地震检波器主要包括简谐振子、光波导偏振器、光电探测器和数字信号处理电路^[1]。简谐振子是整个检波器的关键部位, 主要由质量块、LiNbO₃ 基底和双马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪组成, 其设计和制配的优劣、灵敏度和性能对整个检波器有至关重要的作用。高质量的简谐振子要边缘棱角清楚, 整体上整齐清晰, 质量块和基底的边缘无花纹和斑点^[2]。

有限元法是一种求解数理方程的数值计算方法, 它是一个用于数值计算功能强大的工程工具。它将计算机软件、计算数学和弹性理论有机地结合起来, 由于该方法的有效性、快速和灵活, 使其迅速发展为求解各领域数理方程通用的近似计算方法^[3]。本文采用有限元法对简谐振子的结构进行分析。

法^[3]。本文采用有限元法对简谐振子的结构进行分析。

1 简谐振子的工作原理

MOEMS 三分量加速度地震检波器的工作原理是当检波器受到一外来的地震波时, 质量块由于受到震动产生横梁的弯曲变化, 引起信号臂上的光相位发生改变, 从而分别沿 x 、 y 、 z 3 个方向激发检波器, 干涉光强由 M-Z 干涉仪检测, 并由数字信号处理电路进行进一步的相位探测, 最后从双 M-Z 干涉仪的输出光强中提取感应到的加速度信号^[4]。经典简谐振子的运动遵从方程^[5]

$$F = -kx = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (1)$$

式中: m 为简谐振子的质量; k 为弹性常数。它的解

收稿日期: 2014-06-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41074090); 河南省科技计划重点攻关项目资助(022102210360)

作者简介: 恩德(1962-), 男(蒙古族), 内蒙古通辽人, 博士, 主要从事集成光学与传感器技术研究。E-mail: ende@hpu.edu.cn。

为

$$x(t) = A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t) \quad (2)$$

式中: $\omega = \sqrt{k/m}$ 为振动的角频率; 势能 $V(x) = \frac{1}{2} k x^2$ 为抛物线形式。

当然, 在实际中简谐振子只是一种理想系统。然而, 对于任何势能, 在 $V(x)$ 其极小值附近都可近似为抛物线形式。在极小值处把它用泰勒级数展开得

$$V(x) = V(x_0) + V'(x_0)(x - x_0) + \frac{1}{2} V''(x_0)(x - x_0)^2 + \dots \quad (3)$$

$V(x_0)$ 是常数可去掉, $V'(x_0)$ 因为是极小点, 忽略高阶项, 势能函数变为

$$V(x) \approx \frac{1}{2} V''(x_0)(x - x_0)^2 \quad (4)$$

它描述围绕点 x_0 的简谐振动, 力常数为 $k = V''(x_0)$ 。任何振动只要振幅很小都可近似成为简谐振子。

2 简谐振子的三维有限元分析

ANSYS 是美国 ANSYS 公司研制的有限元分析 (FEA) 软件, 可进行结构、传热、流体等问题的耦合分析。用户可按照几何画图描述、单元选择及剖分、设定几何约束及施加外力、选择算法及运行、观察计算结果及可视化输出等步骤这样非常规范化的流程来执行。ANSYS 自主建模的方法有自上而下建模和自下而上建模两种方法^[6-8]。

2.1 创建简谐振子质量块的实体模型

采用自上而下建模的方法建立简谐振子中质量块的实体模型。质量块模型的尺寸如表 1 所示。

表 1 质量块的尺寸

长/ μm	宽/ μm	整高/ μm	两个边高/ μm
72	48	48	15

通过 ANSYS 软件, 得到质量块生成的实体模型如图 1 所示。



图 1 简谐振子的质量块实体模型

2.2 简谐振子材料的选择

考虑到三分量加速度地震检波器集成化和简谐振子腐蚀质量的要求, 选择单晶硅作为简谐振子中质量块的材料。硅单晶是以纯度极高的多晶硅为原料, 通常由直拉法 (Czochralski 法) 和区熔 (Float-Zone) 法成长而成^[9-10]。

2.3 划分网格

网格划分的控制技术主要涉及单元形状、中间节点位置和单元大小等方面。首先选择单元类型为 Solid 中的 Brick 8node 45, 它是一种抛物线形实体四面体单元。定义材料属性, 依次设置弹性模量、泊松比和密度。最后采用智能分网的方式划分网格, 为提高计算精度, 设置网格尺寸级别为 1。

2.4 施加载荷并求解

载荷是指在实体模型上的位移、力、温度等, 选择合适的载荷对分析结果的影响大, 施加载荷的关键是确定载荷的类型。由于质量块与基底固联, 因此对几何模型两侧的两个底面施加位移约束, 然后对模型右侧面上编号为 414 的结点施加水平方向即沿 x 方向的力, 结果如图 2 所示。

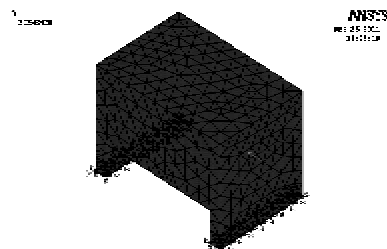


图 2 施加载荷后的示意图

2.5 静力分析结果

静力分析用于计算在固定不变的载荷作用下结构的效应, 不考虑惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移、应力、应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定, 即假定载荷和结构的响应随时间的变化很缓慢^[11]。查看实体模型 x 、 y 、 z 3 个分量总位移的应力云图的显示结果, 如图 3 所示。由图可知, 实体模型的总位移为 $0.236 \times 10^{-19} \mu\text{m}$ 。

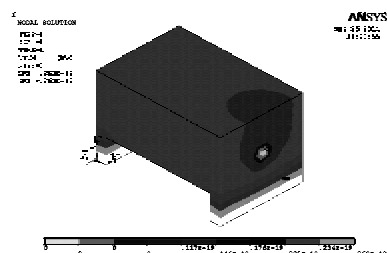


图 3 施加载荷并计算后的应力云图

2.6 模态分析结果

模态分析确定结构的振动特性,通过它确定振型、自然频率和振型参与系数。模态分析有助于在其他动力分析中估算求解控制参数^[12]。

将模态扩展为二十阶,并将频率范围设置为0~100 kHz。由于第五阶振型重复了第一阶振型,故只需观察模型的前4阶振型图,如图4所示。

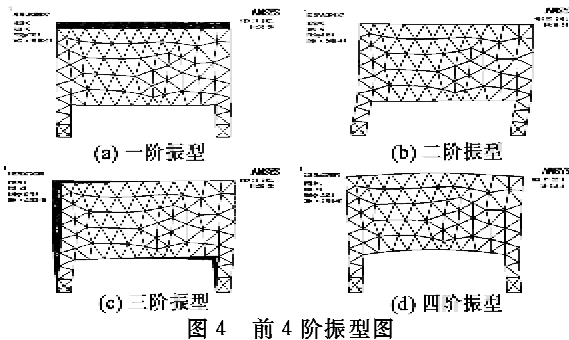


图4 前4阶振型图

由图4可知,第一阶振型沿 z 轴前后振动,第二阶振型沿 x 轴左右振动,第三阶振型是在 xz 平面内的弯曲振动,第四阶振型是在 xy 平面内的弯曲振动。因此,该模型结构在受到沿 x 方向的载荷时刚度最差,是结构的薄弱方向。

图5为第二十阶的总位移变形图(应力云图),图中包含变形后和未变形的轮廓线,下方的色谱表明不同的颜色对应的数值。

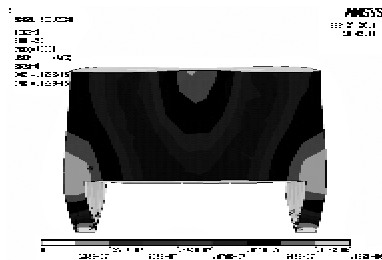


图5 二十阶的总位移变形图

由图5可知,实体模型的二十阶振型频率为78 001 Hz,二十阶的总位移是 $0.122 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 。第二十阶节点414的弹性等效应变随时间变化的关系曲线如图6所示。

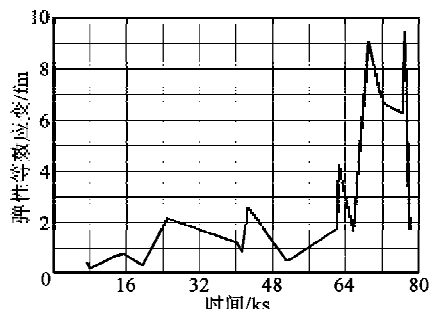


图6 弹性等效应变随时间变化的关系曲线

3 结束语

利用 ANSYS 软件对三分量加速度地震检波器简谐振子质量块建立了几何模型,施加载荷进行求解,进行结构静力学分析,得出实体模型的总位移是 $0.236 \times 10^{-19} \mu\text{m}$ 。取前4阶模型进行分析,得出该模型结构在受到沿 x 方向的载荷时刚度最差,是结构的薄弱方向。并对简谐振子质量块的实体模型进行了模态分析,得到二十阶振动模态的频率是78 001 Hz,二十阶的总位移是 $0.122 \times 10^{-6} \mu\text{m}$ 。

参考文献:

- [1] 唐东林.集成加速度地震检波理论与实验研究[D].天津:天津大学,2006:7-9.
- [2] 恩德,魏建霞,徐可欣,等.高精度硅微简谐振子的设计与制作工艺[J].纳米技术与精密工程,2007,5(2):117-120.
EN De, WEI Jianxia, XU Kexin, et al. Design and fabrication process of a Si-based high precision harmonic oscillator[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2007, 5(2): 117-120.
- [3] 朱伯芳.有限单元原理与应用[M].北京:中国水利水电出版社和知识产权出版社,2009.
- [4] 恩德,冯捷逾,张宁波.三分量加速度地震检波器光弹波导特性分析[J].应用光学,2011,32:39-43.
EN De, FENG Jieyu, ZHANG Ningbo. Analysis of characteristics of photoelastic waveguides in three-component acceleration seismic geophone[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32: 39-43.
- [5] 黄伯坚.大学物理[M].通山:华中科技大学出版社,2006.
- [6] 薛凤先,胡仁喜,康士廷,等. ANSYS12.0机械与结构有限元分析从入门到精通[M].北京:机械工业出版社,2010.
- [7] 曾攀,曹丽萍,方刚.基于ANSYS平台有限元分析手册:结构的建模与分析[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [8] 尚晓江,邱峰,赵海峰,等. ANSYS结构有限元高级分析方法与范例应用[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [9] 王占国,陈立良,屠海令.中国材料工程大典[M].北京:化学工业出版社,2006.
- [10] 方昆凡.工程材料手册——有色金属材料卷[M].北京:北京出版社,2002.
- [11] AFSHAR A, ABBASI M, ESLAMI M R. Two-dimensional solution for coupled thermoelasticity of functionally graded beams using semi-analytical finite element method[J]. Mechanics of Advanced Materials and Structures, 2011, 18(5): 327-336.
- [12] BROWN L W, SMITH L M. A simple transversely isotropic hyperelastic constitutive model suitable for finite element analysis of fiber reinforced elastomers[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2011, 133: 1-13.