

文章编号 :1005 - 5630(2003)03 - 0017 - 04

光开关中静电驱动的微悬臂梁耦合分析*

马海阳,王艳华,王明亮,孙道恒
(厦门大学机电工程系,福建 厦门 351005)

摘要:采用顺序耦合法,对光开关中的、静电驱动的悬臂梁进行分析,得出了悬臂梁的动态响应特性,并指出了空气阻尼对器件性能的影响,为微机械传感器的设计提供了有力的分析方法。

关键词:悬臂梁;静电力;顺序耦合

中图分类号:TP211.4 **文献标识码:**A

The sequential coupling analysis of a cantilever driving by electrostatic force in an optical switch

MA Hai-yang, WANG Yan-hua, WANG Ming-liang, SUN Dao-heng
(Mechatronics of Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: In the article a sequence coupling method is used for the analysis of a cantilever beam in an optical switch, which is driven by electrostatic force. From the analysis, the dynamic character of the beam has been gained, that pointing out the influence of air damping. The method is a powerful method for designing sensors of Micro Electronics Mechanical System (MEMS).

Key words: cantilever beam; electrostatic force; sequential coupling

1 引 言

静电驱动是硅微机械传感器、微执行器的一种主要的驱动方式,它将电信号转化为机械驱动力,或将电场能转化为机械能。如惯性传感器、微光开关等,大都以一微悬臂梁作为机械驱动部件,在悬臂梁下加一个静电驱动电极,用静电力驱动悬臂梁运动。静电力的大小和频率直接影响了器件的动态性能和响应特性。因此悬臂梁在静电驱动下的动态特性分析成为 MEMS(微电子机械系统)器件仿真的关键技术之一和必不可少的步骤。

2 静电驱动原理

如图 1 所示,是一个硅微机械开关的结构图:一条波导附在微悬臂梁上,梁的两边各有一个电极,悬臂梁在静电力的驱动下左右摆动,从而实现光路的切换。如图 2,长 $l = 400\mu\text{m}$,宽度 $b = 30\mu\text{m}$,厚 $h = 2\mu\text{m}$ 的悬臂梁在静电力的作用下,产生一个微小的形变,根据电磁学理论,梁单位长度上所受的力为:

$$q(x) = \frac{\epsilon_0 b}{2} \left(\frac{V}{d + u(x)} \right)^2 \quad (1)$$

* 收稿日期:2002-11-13

基金项目:国家自然科学基金项目(50275127)

作者简介:马海阳(1978-),男,福建龙岩人,硕士研究生,从事机电方面的研究。

上式 ϵ_0 是真空介电常数, V 是梁上施加的电压, $u(x)$ 是坐标为 x 处梁 y 方向的位移 $d = 4.0\mu\text{m}$ 是梁与电极的初始间距。于是整个梁的控制方程可以用如下欧拉方程来表示:

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = -q(x) + a \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \tag{2}$$

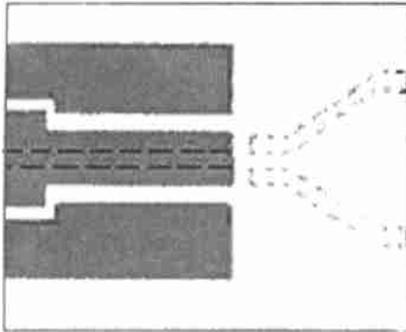


图 1 光开关结构图

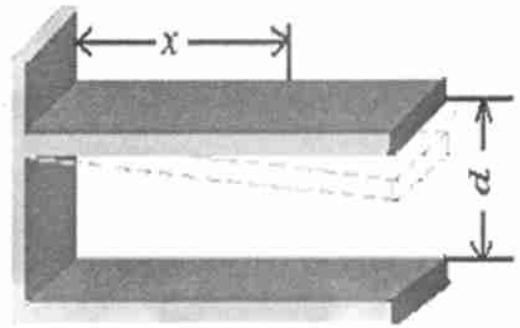


图 2 静电力下悬臂梁变形图

其中上式左边代表梁的弹性力, $E = 1.7 \times 10^5 \text{MPa}$ 是硅的杨氏模量, $I = \frac{1}{12}bh^3$ 为梁的截面惯性矩; $q(x)$ 是静电力; 右边第二项是阻尼力, $a = 2.0 \times 10^{-3} \text{kg/m} \cdot \text{s}$ 是空气粘滞系数; 右边第三项代表惯性力, $= 1.4 \times 10^{-13} \text{kg}/\mu\text{m}^2$ 为梁的线密度。

上述两式描述了悬臂梁在电压 V 下的运动方程, 它包含两个物理场——静电场和结构场。结构场在静电场的作用下产生变化, 从而改变了静电场; 静电场的变化又反过来影响结构场的变化, 两者相互耦合。文献 2 中采用解析的方法, 近似求出了所加电压与梁自由端位移的关系:

$$V = \frac{(hd)^{\frac{3}{2}}}{l_2} \left(\frac{2E}{3} \right)^{\frac{1}{2}} \left| \frac{2}{3(1-\eta)} - \frac{\ln(1-\eta)}{3} - \frac{1}{2\sqrt{\eta}} \ln \frac{1+\sqrt{\eta}}{1-\sqrt{\eta}} \right|^{-\frac{1}{2}} \tag{3}$$

其中 η 是梁端最大位移与初始间距 d 的比值。但 (3) 只能求解静态问题, 对于光开关这种动态器件, 开关的动态特性——光路切换速度, 是一个非常重要的参数, 文献 2 并没有给出。本文采用顺序耦合法, 对上述两个方程进行数值分析, 得出了开关的动态切换速度。

3 顺序耦合法

顺序耦合分析包含两个或多个工程物理场之间相互作用分析, 各个物理场按顺序一个一个循环分析, 前一个物理场分析的结果作为后一个分析的边界条件或载荷。图 3 描述了光开关结构静电顺序耦合分析的数据流程图。首先用两结点的梁单元将悬臂梁划分成 100 等分, 从固定端到自由端, 结点号依次增大从 0 到 101, 建立悬臂梁的运动平衡方程:

$$M \ddot{X} + C \dot{X} + KX = F \tag{4}$$

上式 $X = R^n \times 1$ 是一个状态向量, 它包括各个离散结点的位移, M 、 C 、 K 都是 n 阶方阵, 分别是结构的质量、阻尼和刚度矩阵, $F = R^n \times 1$ 是结构结点载荷向量, n 是结构离散结点的个数。由于载荷向量是一个随结构位移和电压变化的物理量, 运动平衡方程 (4) 不是常系数微分方程组, 不能用常规的方法直接求解。

然后, 以结构的当前形状作为静电场的边界条件, 由 (1) 式可以求出结构上各点所受到的静电力, 这个力就是结构此时的结点载荷向量。接着采用参数 $\beta = 0.253$, $\gamma = 0.505$ 的 Newmark 积分法, 对 (4) 式在一个很短的积分步内进行积分, 将得到的结果重新作为静电场的边界条件, 求解结点载荷向量, 循环往复, 直至求解时间完成。

4 结果分析

根据弹性力学理论, 该悬臂梁的最低固有频率为 73.4kHz。为了比较梁的振动频率相对固有频率的漂移以及空气阻尼对器件性能的影响, 计算了空气阻尼系数分别为 $2E^{-7}$ 和 0.002 时梁的位移。如图 4, 图

5 所示,施加电压为 30V,梁的端点和中点随时间变化的位移曲线。图 4 表明,由于存在空气阻尼,梁在平衡位置振荡并逐渐趋于稳定,而且由于非线性静电力的调制,梁的振动频率相对固有频率向下发生漂移,为 69.9kHz。从图 5 可以看出,悬臂梁在空气阻尼的作用下 40 μ s 就趋于稳定,得到了很好的动态开关特性。表 1 列出了利用顺序耦合法,梁自由端在各种电压下的位移,并将位移结果代入(3)式,计算出相应位移所需施加的电压。

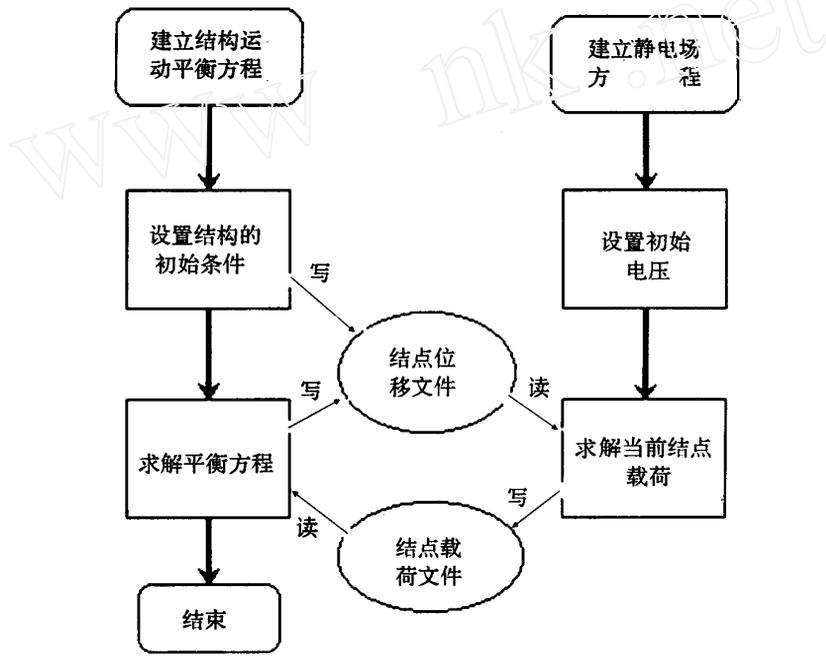


图 3 顺序耦合分析数据流程图

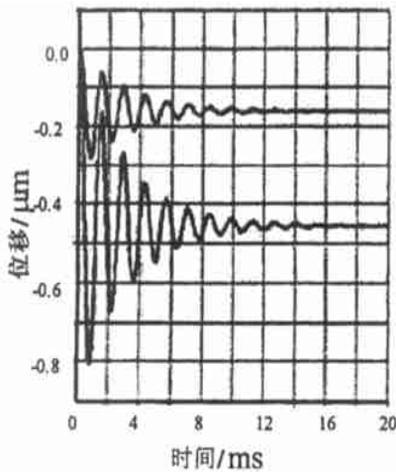


图 4 阻尼系数 1e-7 时的位移曲线图

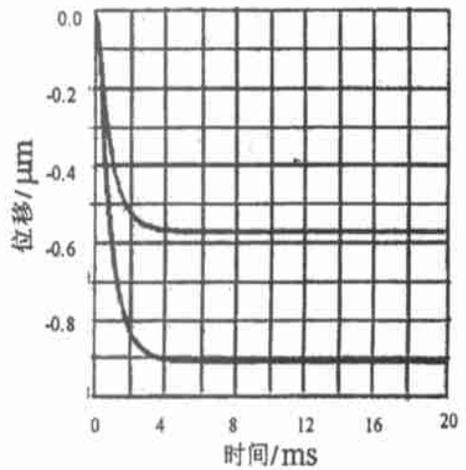


图 5 阻尼系数 0.002 时的位移曲线图

表 1 两种方法的比较

位移(μ m)	0.18	0.30	0.46	0.67	1.00	1.20	1.60
耦合法(V)	20	25	30	35	40	42	44
解析法(V)	18.9	23.7	28.6	33.4	38.4	40.5	42.8

由于静电力大小与距离的平方成反比,电压逐渐加大时,悬臂梁与基底的距离变小。当施加电压达到一定大小时,静电力的将大于梁的弹性力,使梁失去平衡。图 6 给出了阻尼系数为 0.002 施加电压 45V

时悬臂梁末端的位移响应图,可见该梁结构的阈值电压为 45V。

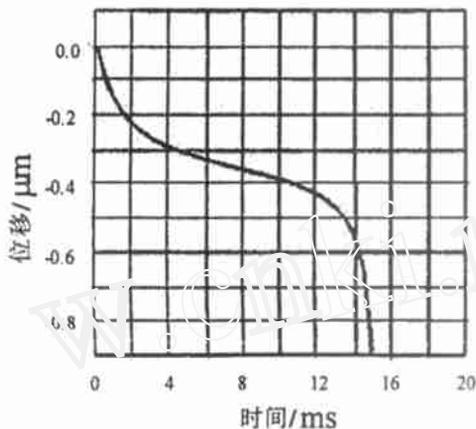


图 6 阈值电压下的位移响应图

5 结 论

本文对光开关中的悬臂梁机构,采用数值的方法,得到了悬臂梁的动态位移响应,并与解析的方法相比较,取得了很好的效果,指出了阻尼对器件性能的影响,为光开关等硅微机械传感器的设计提供了有力的分析方法。

6 参 考 文 献

[1] 贾玉斌, 陈良惠, 李玉璋. 一种微机械光开关的分析和设计[J], 半导体学报, 2001, 22(7):837 ~ 840.
 [2] Bathe KJ, Wilson E.L. 有限元分析中的数值方法[M], 北京:科学出版社, 1985, 454 ~ 596.

消 息

图像分析系统

美国 Syncroscopy 公司的自动剪辑型图像分析系统具有许多独特的性能,它能确保用户在三维样品工作时拥有最大的柔性,并能产生最好的样品图像。该系统中包括一些速度非常快的算法,它们可在许多三维成像应用中控制剪辑方法。该系统还有一张置信度映射图像,它可指出信息已被解释到何种程度。

(摘自《红 外》)