

静电式微开关硅悬臂梁的变形分析

陈广文, 许高攀, 胡国清

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 介绍了一种计算微开关的硅悬臂梁在电场力作用下的变形的办法, 由于作用在梁上的载荷随着梁的变形而变化, 用积分法计算存在相当困难, 以下提出了一种计算变形的办法: 将梁分为 m 个小区段, 则梁上的分布力可近似为 m 个集中力, 将初始均布载荷分成 n 步, 逐步加载, 在每个载荷步后根据变形结果修正 m 个集中力, 同时增加一个载荷增量, 作为下一步的载荷。只要 m 和 n 取到充分大, 就可得到梁变形的精确结果。

关键词: 悬臂梁; 变形; 增量法

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-9787(2001)12-0029-03

Deformation analysis of silicon cantilever for electrostatic microswitch

CHEN Guang-wen, XU Gao-pan, HU Guo-qing

(Dept. of Mech. and Elec. Engin., Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The deformation analysis of a silicon micromachined cantilever of electrostatic microswitch is presented. From analysis, it has been known that the force applied on the cantilever varies according to the deformation of cantilever, so it is difficult to solve the differential equation of the deformation, especially, the load is changing. A new method to solve this problem was presented as follows, the cantilever is divided into a number of small segments, it is assumed that every segment has a constant concentrated force, and the force of electricity is loaded step by step, when the segment and load step is small enough, the simulation result will be limited to accuracy.

Key words: cantilever; deformation; enhancement method

0 前言

利用 MEMS 微加工技术制作的微开关, 由于实现了触点的金属—金属接触, 因而具有接触电阻低、隔离度高的优点, 在信号处理、通讯系统以及微系统等方面有着广阔的应用前景, 对一种普遍采用的悬臂式静电驱动微开关的受力及变形进行了分析, 给出了一种计算变形的数值解法。

1 静电型微开关的工作原理

静电型微开关的原理^[1]如图 1 所示。

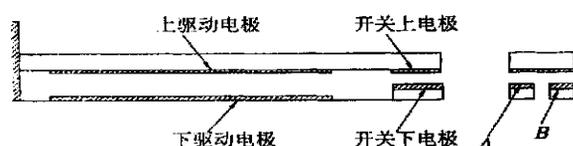


图 1 微开关示意图

Fig. 1 Schematic of a microswitch

其主要部件是一个硅悬臂梁, 在梁的底面溅射有一层金属层作为上驱动电极, 同样, 在底板上对应驱动下电极, 当在上下驱动电极间施加驱动电压时, 悬臂梁产生变形, 当梁接触到下面的触点后, 接通触点 A、B, 实现开关的闭合。

显然, 硅悬臂梁的受力与变形决定了触点的接触状态及接触压力, 因此必须对悬臂梁的变形过程进行分析, 为静电微开关的结构设计提供理论依据。

2 硅悬臂梁的受力及变形分析

2.1 受力分析

当施加电压后, 作用在梁单位面积上的电场力为 $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$, 其中 ϵ_0 为电极间的介电常数; E 为电场强度。在纯弯曲的情况下, 弯矩与曲率间的关系^[2]为

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{EI}$$

式中 ρ 为曲率半径; M 为弯矩; E 为杨氏弹性模量; I 为梁的惯性矩。对于跨度远大于截面高度的梁, 剪力对弯曲变形的影响可以忽略, 上式可作为横力弯曲变形的基本方程, 在小变形的情况下挠曲变形 v 可采用近似方程表示为

$$\frac{d^2 v}{dx^2} = \frac{M}{EI}$$

梁受的载荷如图 2 所示。

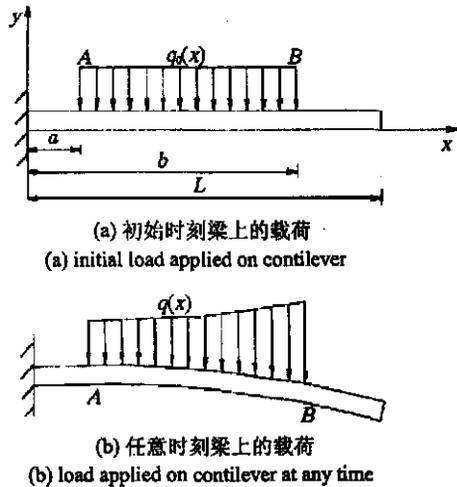


图 2 悬臂梁的载荷分布图

Fig. 2 Load applied on cantilever

其中图 2(a) 为初始时刻的载荷分布, 随着梁的

变形, 极板之间的电场力 $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ 随上下两电极的间距和电场强度的改变而改变, 因此, 在任意时刻, 梁受的载荷如图 (b), AB 段的载荷分布力为

$$q(x) = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{U^2}{(d - v(x))^2}, \quad (1)$$

式中 U 为驱动电压; d 为上下电极的初始间距; $v(x)$ 为梁上 x 点处的变形挠度。可见, 分布力 $q(x)$ 不仅是 x 的函数, 也是 $v(x)$ 的函数。分段列出弯矩方程为

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = \int_0^a x \cdot q(x) dx - \int_0^a q(x) dx \quad 0 < x < a;$$

$$EI \frac{d^2 v}{dx^2} = \int_a^b q(x) dx, \quad a < x < b.$$

可以看出, 在加载的过程中, 载荷随着挠度发生变化, 要解此微分方程组存在相当困难。

2.2 利用增量法求解梁在时变载荷下的变形

利用有限元解决非线性问题的增量法及梁变形的迭加原理^[2], 提出一种数值解法, 避免了解微分方程带来的困难, 较精确地计算出了梁变形, 方法如图 3 所示。

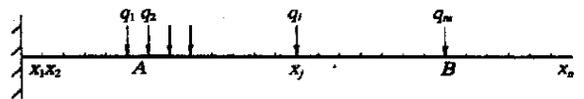


图 3 悬臂梁变形计算方法示意图

Fig. 3 Schematic of the method of calculation

将初始力 $q_0(x)$ 分为 n 个均匀的载荷 $q = q_0(x)/n$ 逐步加载, 最初, 以一个 q 力作为均匀的初始载荷, 为便于利用迭加法, 将此均布载荷等效为 m 个集中力: q_1, q_2, \dots, q_m , 计算出在此 m 个集中力作用下梁上 n 个点的变形挠度, 然后将此 n 个点的变形带入式 (1), 修正出在此挠曲变形下对应的 m 作用点上力 q_i , 以 $(q_i + q)$ 作为第二步的载荷继续计算, 由于在计算过程中每一次只增加一个 q 的载荷, 所以可以认为在计算过程中载荷不随 $v(x)$ 变化的, 依此类推, 每次计算都以上一步变形结果修正后的分布力加上一个 q 作为本步的载荷, 当梁末端弯曲变形至接触点时, 开始按一端固支, 一端简支梁的变形进行计算。直至 n 个 q 加载完毕。

如图 3 所示, 载荷区被等分成 m 个小段, 每段长为 x , 在每个小段上, 载荷被认为是均匀分布, 因此, 可以看作每个小段上受到集中载荷 q_i 的作用, 则 $q_i = \frac{1}{2} \epsilon_0 \frac{U^2}{(d - v(x_i))^2} x$, 根据悬臂梁受集中载荷作用的挠度公式, 可计算出梁上 x_1 至 x_n 各点在 q_i 单独作用下的挠屈变形^[2], 其表达式为

$$v = \frac{q_i x^2}{6 EI} (3x_i - x), \quad 0 < x < x_i,$$

$$v = \frac{q_i x^2}{6 EI} (3L - x_i), \quad x_i < x < L.$$

因此梁的变形可以看成是 m 个力分别作用后迭加的结果。设在对梁上取 n 个点计算该点处的挠度, 则在 $q_1, q_2, \dots, q_i, \dots, q_m$ 的力的作用下, 各点的变形为

$$\begin{cases} V_{q1} = (v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}) \\ V_{q2} = (v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2n}) \\ \dots \\ V_{qm} = (v_{m1}, v_{m2}, \dots, v_{mn}) \end{cases}$$

将此 $m \times n$ 矩阵的各列元素相加,得到

$$V_i = (v_i, v_2, \dots, v_n)$$

此即第 i 个载荷步,悬臂梁上 n 个点的变形挠度,将每个点的变形 v_i 代入电场 $\frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$ 的计算公式,便得到在此变形下的新电场力 q_i ,以 $(q_{i+1} + q)$ 作为下一步计算的集中载荷,如此循环直至悬臂梁自由端接触到下触点,当梁接触到下触点后,开始按照一端固支,一端简支梁的变形开始计算,方法和步骤同上。当 m, n 都趋向于无穷大时,便可得到载荷 q , 变形 v 的精确解。

3 计算实例和结果

下面给出一个具体的计算实例与结果。

设硅梁的宽度 $b = 30\mu\text{m}$,厚度 $h = 6\mu\text{m}$,悬臂长 $L = 100\mu\text{m}$,驱动电压 130V ,电场力作用在 $10\mu\text{m}$ 至 $70\mu\text{m}$ 区域,悬臂梁与底板间距为 $1\mu\text{m}$,触头高度 $0.5\mu\text{m}$,计算过程分为 500 个载荷步。

计算出的最终变形及分步变形如图 4、图 5 所示。图 4 为按此计算方法得出的悬臂梁最终变形状态,图 5 中的线条为梁在逐步加载过程中各个载荷步下的变形。

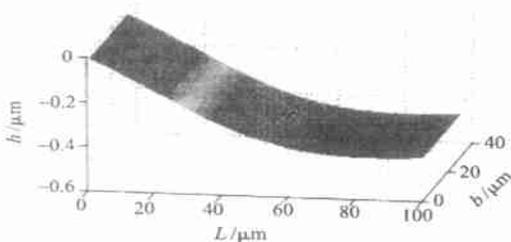


图 4 悬臂梁最终变形结果三维图

fig. 4 3D graphic of the deformation of cantilever

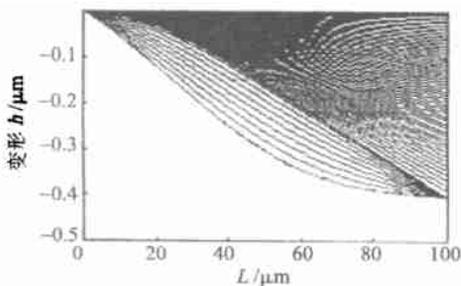


图 5 悬臂梁分布加载变形结果图

Fig. 5 Deformation of cantilever at each load step

3.1 触点接触状态分析

悬臂梁的最终变形结果,决定了悬臂梁末端与触点的接触状况,三种不同的接触状态如图 6 所示。

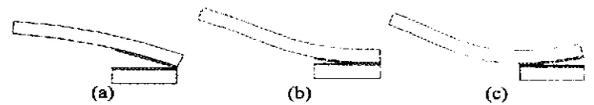


图 6 悬臂梁末端与触点接触的不同状态

Fig. 6 Different touch mode of the tip of the cantilever

显然,图 6(b) 获得最佳接触状态,因此梁的最终变形将直接影响到触点的接触状态,而梁的变形由梁的结构参数、材料性能、以及驱动电压共同决定,当结构参数及材料固定时,不同的驱动电压将获得不同的接触状态,图 7 为同一悬臂梁在不同驱动电压下的最终挠曲变形,可见,当电压取 130V 时,获得最佳接触状态。

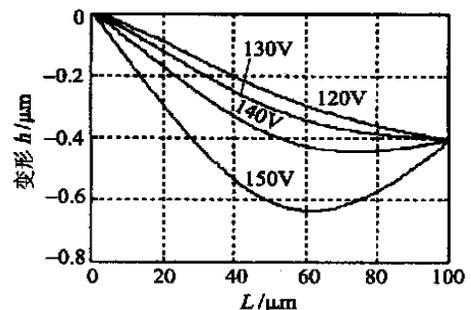


图 7 不同驱动电压下的悬臂梁变形

Fig. 7 Deformation of the cantilever at different voltage

4 结论

通过对上面实例的分析,证明了这种方法的可行性,在计算中,只要 n 和 m 取足够大,就能够获得比较精确的变形计算结果,从而避免了积分法带来的困难,计算结果对微开关的结构设计具有指导意义,为设计提供了一种便捷可行的方法。

参考文献:

[1] Sumit Majumder,Mc Gruer N E,George G Adams ,et al. Study of contacts in an electrostatically actuated microswitch[J]. Proc. of IEEE,1998 ,(8) :127 - 131.

[2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京:高等教育出版社,1991. 225 - 249.

作者简介:

陈广文(1972 -),男,湖南长沙人,厦门大学机电系 99 级研究生,研究方向:机电一体化、微传感器。