

C型 MEMS 平面微弹簧弹性系数研究

吴鹏飞, 张国俊, 钟志亲, 戴丽萍, 王姝娅

(电子科技大学 电子薄膜与集成器件国家重点实验室, 四川 成都 610054)

摘要:设计了一种新型的 C 型微机电系统(MEMS)平面微弹簧,用卡氏第二定律和胡克定律推导出这种平面微弹簧在 3 个方向(即 x , y 和 z 方向)上的弹性系数计算公式,用 ANSYS 进行有限元仿真,结果验证了公式推导的正确性。在公式计算和仿真的基础上,研究了各种结构参数对其弹性系数的影响规律。

关键词:微机电系统(MEMS);平面微弹簧;弹性系数;有限元方法

中图分类号:TH703 **文献标识码:**A

Study on the Elastic Coefficient of C-form MEMS Planar Microsprings

WU Pengfei, ZHANG Guojun, ZHONG Zhiqin, DAI Liping, WANG Shuya

(State Key Lab. of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: A new type of C-form MEMS planar microsprings are designed and the elastic coefficient Formula of the C-form MEMS planar microsprings in three directions (x direction, y direction and z direction) is derived by using Card's second law and Hooke's law and ANSYS finite element simulation results verify the correctness formula. On the basis of the formula and simulation, the law of various structural parameters on the impact of elasticity are studied.

Key words: MEMS; planar microspring; elastic coefficient; finite element method(FEM)

0 引言

近年来,微机电系统(MEMS)在汽车、国防、生物医学、航空航天和通讯等方面都得到了广泛应用^[1]。微弹簧是一种重要的 MEMS 结构,是微加速度计、微陀螺仪和微执行器等的重要组成部分,微弹簧的性能会对器件能否按照设计要求正常工作起重要作用^[2]。与传统的弹簧相比,微弹簧的设计灵活多变,结构多种多样;同时,加工微弹簧所用材料不同,微弹簧的弹性系数一般通过有限元软件仿真计算或实验测得,给设计和加工带来不便^[3-6]。本文运用能量法的卡氏第二定律^[7]和胡克定律,推导了开口 C 型的微弹簧在线性范围内 3 个方向(即 x , y 和 z 方向)的弹性系数计算公式,并用 ANSYS 软件仿真验证了公式的正确性。

1 弹性系数公式的推导

1.1 C 平面微弹簧几何结构和参数

C 型平面微弹簧由 n 节结构相同且对称的基本单元组成,一节 C 型微弹簧的平面几何结构和参数

如图 1 所示,图中, B 为微弹簧横截面宽度, H 为微弹簧横截面厚度, R 为微弹簧的弯半径。

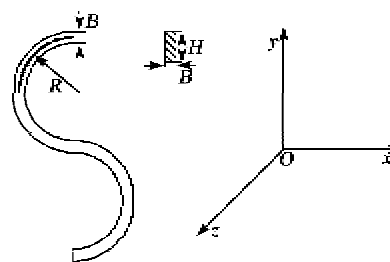


图 1 C 型平面微弹簧的结构形式和参数

1.2 C 型微弹簧在 y 方向的弹性系数计算

微弹簧在 y 方向受力时,横截面上的剪力和轴力引起的变形都很小,因此在计算时可忽略,只考虑弯矩引起的变形。该段微弹簧的总应变能为

$$U = \sum_{i=1}^n \int_l \frac{M_i^2(x)}{2EI} dx \quad (1)$$

式中: $I = BH^3/12$ 为截面的惯性矩; $M_i(x)$ 为第 i 节弹簧截面所受的弯矩; E 为材料的弹性模量。

根据卡氏第二定律,若于外力作用于一弹性体

收稿日期:2011-05-18

作者简介:吴鹏飞(1987-),男,安徽巢湖人,硕士生,主要从事 MEMS 加速度计的研究。E-mail:afeizhengzhuang@126.com

上,此弹性体的总变形能对任一外力 F_i 的偏导数,等于该力 F_i 作用点沿该力作用方向的位移。该段微弹簧的总位移为

$$S = \partial U / \partial F \quad (2)$$

取其中一节弹簧分析,由于弹簧结构的对称性,只需分析其中的 1/4 部分即可,建立模型如图 2 所示。假定 b 端的截面固定,在 a 端施加 y 方向的力为 F 。

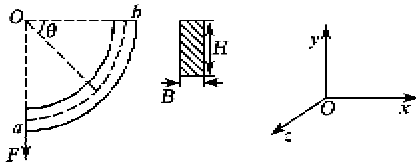


图 2 1/4 节弹簧 y 方向受力示意图

在弹簧的线性范围内,运用卡氏第二定律进行分析:

$$M(\theta) = FR \cos \theta \quad 0 \leq \theta \leq \pi/2 \quad (3)$$

故微弹簧在 a 点处沿力 F 的位移为

$$\delta = \frac{\partial V}{\partial F} = \int_0^{\pi/2} \frac{M(\theta)}{EI} \frac{\partial M(\theta)}{\partial F} R d\theta = \frac{F\pi R^3}{4EI} \quad (4)$$

式中 V 和 $M(\theta)$ 分别为该 1/4 段弹簧的应变能和截面所受的弯矩。则整个弹簧的位移为

$$S = 4n\delta = F n \pi R^3 / (EI) \quad (5)$$

根据胡克定律, n 节弹簧在集中力 F 方向上的弹性系数可表示为

$$K_y = F/S = F / (4n\delta) \quad (6)$$

经计算可得 n 节弹簧在 y 方向上的弹性系数为

$$K_y = B^3 HE / (12n\pi R^3) \quad (7)$$

1.3 C 型微弹簧在 x 方向的弹性系数计算

同样对一节弹簧的 1/4 部分进行分析,建立模型如图 3 所示。将 b 端的截面固定,在 a 端施加 x 方向的力为 F 。

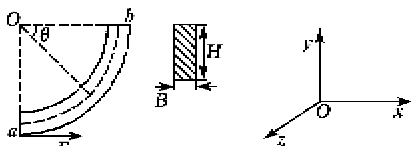


图 3 1/4 节弹簧 x 方向受力示意图

运用卡氏第二定律和胡克定律可推导出弹簧在 x 方向的弹性系数计算公式为

$$K_x = \frac{B^3 HE}{36n\pi R^3 + 48\pi R^3 [1^2 + 2^2 + \dots + (2n-1)^2]} \quad (8)$$

1.4 C 型微弹簧在 z 方向的弹性系数计算

对于 z 方向同样取一节弹簧的 1/4 部分进行分

析,建立模型如图 4 所示。将 b 端的截面固定,在 a 端施加 z 方向的力为 F 。

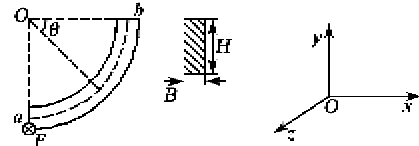


图 4 1/4 节弹簧 z 方向受力示意图

运用同样的力学原理求弹簧在弯曲和扭转共同作用下的位移,求解过程类似,可推导出弹簧在 z 方向的弹性系数计算式为

$$K_z = \left\{ \frac{2n\pi R^3}{GI_t} + \frac{\pi R^3}{2EI} [1^2 + 3^2 + \dots + (4n-1)^2] + \frac{\pi R^3}{2GI_t} [1^2 + 3^2 + \dots + (4n-1)^2] \right\}^{-1} \quad (9)$$

式中: $G = 2E / (1 + 2\varepsilon)$ 为材料的切变模量, ε 为材料的泊松比; $I_t = \beta HB^3$ 为极惯性矩, β 为与 H/B 比值相关的系数,可查表^[7]得到。

2 ANSYS 仿真实验验证

为了验证公式推导的正确性,利用有限元仿真软件 ANSYS10.0 对该微弹簧结构进行仿真。我们选用镍材料,其 $E = 1.8 \times 10^5$ MPa, $\varepsilon = 0.3$ 。弹簧的结构参数为: $H = 200 \mu\text{m}$, $B = 20 \mu\text{m}$, $R = 220 \mu\text{m}$, $n = 7$ 。将上述参数分别代入式(7)~(9)计算可得弹簧沿各个方向的弹性系数: $K_x = 0.217\ 607$ N/m、 $K_y = 102.493\ 2$ N/m 和 $K_z = 0.555\ 021\ 5$ N/m。

按照上述参数在有限元仿真软件 ANSYS 中建立模型,其他单位是它们的组成单位。单元类型选为 PLANE82 和 SOLID95,网格划分长度定为“10”,分析类型为静态分析。将第一节弹簧的横截面施加全约束,分别在下端沿 x 、 y 和 z 方向施加 500 μN 的力,仿真结果如图 5 所示。

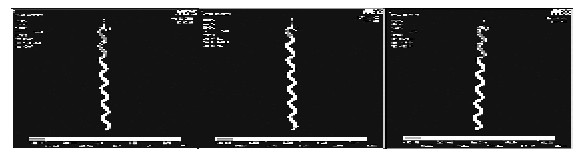


图 5 微弹簧分别在 3 个方向上受力时变形的仿真结果

由图 5 可见,微弹簧在 3 个方向力的作用下位移分别为 2 247 μm 、4. 706 μm 和 862. 58 μm ,根据胡克定律可得到微弹簧沿 3 个方向的弹性系数分别为: $K_x = 0.222\ 518$ N/m、 $K_y = 106.247\ 3$ N/m 和 $K_z = 0.579\ 656$ N/m。比较仿真值和理论值,其相对误差分别为 2. 207%、3. 533% 和 4. 249%,两者基本吻合,验证了公式的正确性。

3 结构参数对弹性系数的影响

采用控制变量法,分别改变微弹簧节数 n 、梁宽 B 、弯半径 R 和厚度 H ,保持其他结构参数不变,利用 ANSYS10.0 对微弹簧 y 方向的受力进行有限元仿真,得到沿 y 方向上弹性系数随结构参数改变的规律。同时,利用式(7)分别计算这 4 组结构参数下微弹簧沿 y 方向上的弹性系数,并与仿真结果进行比较,结果如图 6 所示。

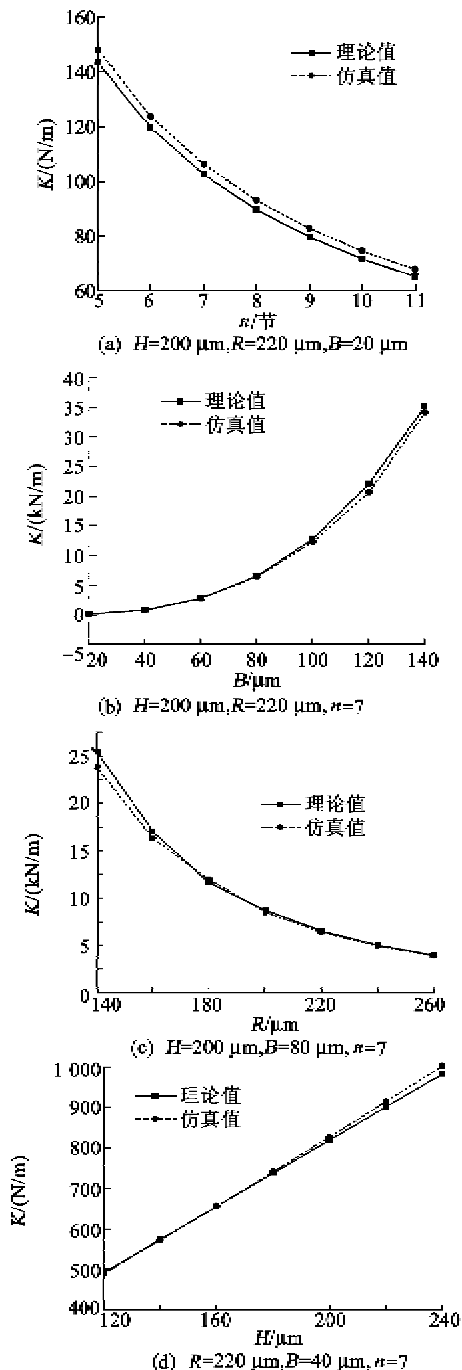


图 6 弹簧 y 方向上弹性系数随结构参数的变化关系

由图 6 可见,在其他结构参数保持不变的情况下,微弹簧的弹性系数 K_y 随 n 和 R 的增大而减小,随 B 和 H 的增大而增大。其中 B 和 R 对 K_y 的影响最大, B 和 R 的稍微变动都将引起 K_y 的较大变化,而 n 和 H 的影响较小,这从式(7)也可看出。

微弹簧在 x, z 方向的受力情况可作类似的分析 and 比较,在此不再赘述。

4 结束语

本文运用宏观理论的能量法和胡克定律,分别推导出 C 型平面微弹簧在 3 个方向上弹性系数的计算公式,ANSYS 有限元仿真验证了公式的正确性。由上述结果也可看到,在同一结构参数下, $K_x < K_y < K_z$ 。理想情况下微弹簧只在 y 方向受力也只需计算 K_y ,但实际情况会在 x, z 方向也有一定力的作用,这使 K_x 和 K_z 的计算很有必要。实际应用中微弹簧若被倾斜放置,总的弹性系数 K 可通过 K_x, K_y 和 K_z 的线性叠加得到。

参考文献:

- [1] 娄利飞. 微机电系统与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2010: 8-13.
- [2] 格雷戈里 T A 科瓦奇. 微传感器与微执行器全书[M]. 张文栋, 李永红, 张斌珍, 等译. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] SETO M W, ROBBIE K, BRETT M J, et al. Mechanical properties of microspring thin films fabricated by glancing angle deposition (GLAD)[C]//Edmonton, Canada; 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1999: 1616-1620.
- [4] BRENNER W, HADDAD G H, RENNHOFER H. New types of silicon torsion microspring and their characterisation[C]//Wien, Austria; Proceedings of SPIE, 2000: 462-470.
- [5] AWAJA N, SOOD D K. Modeling and simulation of a flat spring for use in an electromagnetic microgenerator[C]//RMIT University, Australia; Proceedings of SPIE, 2005: 361-372.
- [6] LI Lijie, UTTAMCHANDANI D G. Analysis of microsprings for calculating the force produced by microactuators[C]//University of Strathclyde, United Kingdom; Proceedings of SPIE, 2002: 394-402.
- [7] 陈昭怡, 吴桂英. 材料力学[M]. 北京: 中国建材出版社, 2005.