

Comparative Study on Stiffness Characterization of Planar S & W-form Micro-Springs Based on MEMS*

HE Guang*, SHI Geng-chen

(National Key Laboratory of Electromechanical Engineering and Control, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract : S-form and W-form are two kinds of typical structure of planar micro-springs based on MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems), because of diverse form they have different mechanics features. This paper presents the study on comparative study on stiffness characterization of nickel planar S & W-form micro-springs based on MEMS by theory analysis, tensile test and ANSYS Finite Element Method. The conclusion has been drawn that the stiffness of a S-form micro-spring is stronger than that of W-form in the case of the same size of outline, feature, thickness and clearance, which is valuable for providing feasible directions to the optimization design and manufacture of the micro-spring.

Key words : Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS); planar spring; spring constant; finite element method (FEM)

EEACC :2575;0290T

平面 S 型与平面 W 型 MEMS 弹簧性能比较研究*

何光*, 石庚辰

(北京理工大学 机电工程与控制国家级重点实验室, 北京 100081)

摘要 : S 型与 W 型是平面 MEMS 弹簧中两种典型的结构形式, 各自结构特点导致了它们具有不同的力学性能。通过理论分析、仿真计算和实验验证方法对平面镍质 S 型与平面 W 型 MEMS 弹簧性能进行了比较研究, 得出了在同样的外廓尺寸及相同的线宽、厚度和梁间距情况下, 平面 S 型微弹簧的刚度大于平面 W 型微弹簧的刚度的结论, 为 MEMS 弹簧的进一步优化设计提供理论参考。

关键词 : 微机电系统; 平面弹簧; 刚度系数; 有限元方法

中图分类号: TH702

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)02-0288-04

微弹簧是一种非常重要且典型的 MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems) 器件, 是微传感器、微执行器和微陀螺仪等的重要组成部分, 它不仅可为其提供弹性力, 而且能够传递能量^[1-2]。因此, 微弹簧的性能对其它器件能否按照设计要求正常发挥作用起着至关重要的作用。

由于受微机械加工工艺特点的限制, 目前由 MEMS 加工技术制造出来的微弹簧大多是平面结构, 其中 S 型和 W 型是两种典型的微弹簧, 如图 1 所示, 结构的不同导致了它们具有不同的力学性能, 并在特定的微机电系统中起到关键作用^[3]。由于微

机电系统零、部件结构尺寸都会受到放置空间的限制, 因此, 在进行微弹簧具体设计时, 采用哪种结构形式较合适就成为其优化设计的首要问题。

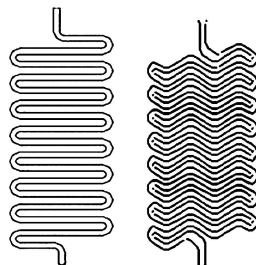


图 1 S 型和 W 型平面微弹簧

基金项目: 中国人民解放军总装备部武器装备预研基金项目资助(51405040205BQ0101)

收稿日期: 2007-09-30 修改日期: 2007-12-29

基于上述原因,本文从 MEMS 最基本的要求——空间尺寸有限这一条件出发,在满足微机械加工技术的条件下,研究了在同样的外廓尺寸及相同的结构特征尺寸(如线宽、厚度和梁间距)情况下,镍质平面 S 型与平面 W 型 MEMS 弹簧刚度性能关系,以此为 MEMS 弹簧的优化设计提供理论上的指导。

1 两种 MEMS 弹簧结构形式及参数

1.1 S 型微弹簧

利用 LIGA 或 UV - LIGA 等 MEMS 工艺加工成的平面 S 型微弹簧的平面结构形式及结构参数如图 2 所示。

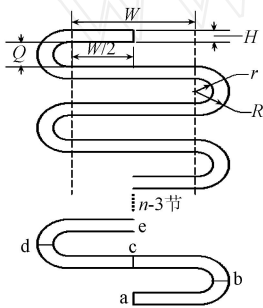


图 2 S 型平面微弹簧结构形式及参数

图中: W - 微弹簧直梁宽度; H - 微弹簧线宽; Q - 微弹簧直梁间距; r - 内弯半径 ($r = Q/2$); R - 外弯半径 ($Q/2 + H$); D - 微弹簧厚度; n - 节数。

1.2 W 型微弹簧

利用 LIGA 或 UV - LIGA 等 MEMS 工艺加工成的平面 W 型微弹簧的平面结构形式及结构参数如图 3 所示。

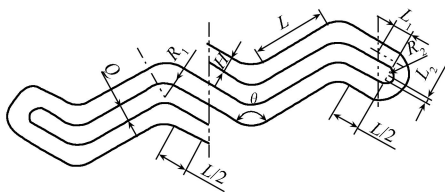


图 3 W 型平面微弹簧结构形式及参数

图中: H - 线宽; Q - 梁间距; L - 单元梁长度; α - 弯梁夹角 ($0 < \alpha < \pi$); R_1 - 簧中部弯梁内侧圆弧半径; R_2 - 簧端部弯梁内侧圆弧半径 ($R_2 < Q/2$)。

每一节微弹簧是由厚度均为 D 的直梁和弯梁连接而成且在同一个平面内,其横截面为矩形。直梁包括单元梁 5 个(每个长度为 L)、半个单元梁 6 个(每个长度为 $L/2$)、2 个端部衔接直梁 L_1 [$L_1 = (Q + H) \text{ctg}(\alpha/2)$] 和 2 个簧端部直梁 L_2 ($L_2 = Q - 2R_2$); 弯梁包括 8 个簧中部连接直梁的弯梁(其外侧圆弧半径为 $R_1 + H$) 和簧端部的 4 个转向弯梁(其外侧

圆弧半径为 $R_2 + H$)。

2 MEMS 弹簧刚度系数计算公式导出

2.1 S 型微弹簧刚度系数计算公式导出

图 2 中的 a 、 b 、 c 、 d 、 e 部分结构即为一节微弹簧,由于其结构具有对称性,取其四分之一进行研究。设在其底部端面的形心(a 点)作用一集中力 P ,它与微弹簧的轴线重合且方向向下,如图 4 所示。

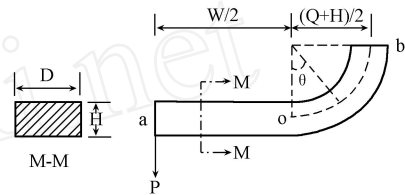


图 4 四分之一节平面 S 型微弹簧横截面及受力示意图

微弹簧横截面上的轴力和剪力所引起的变形都很小,可忽略不计,只考虑弯矩引起的变形。则该段微弹簧的总应变能为:

$$V = \sum_{i=1}^n \int_0^l \frac{M_i^2(x)}{2EI} dx \tag{1}$$

其中, l 、 $M_i(x)$ 、 E 、 I 分别为第 i 段杆件的长度(即 \overline{ao} 和 \overline{ob} 的长度)、弯矩、材料的弹性模量和截面的惯性矩, $I = \frac{DH^3}{12}$ 。则在线弹性范围内,由卡氏第二定理^[4]得微弹簧在 a 点处沿力 P 方向产生的位移 S 为:

$$S = \frac{\partial V}{\partial P} \tag{2}$$

根据胡克定律, n 节微弹簧在集中力 P 方向上的刚度系数 k 可表示为:

$$k = \frac{P}{4nS} \tag{3}$$

经计算得到平面 S 型 MEMS 弹簧的刚度系数的计算公式为:

$$k = 2EDH^3/n[4W^3 + 6(Q + H)W^2 + 24(Q + H)^2W + 3(Q + H)^3] \tag{4}$$

2.2 S 型微弹簧刚度系数计算公式验证

2.2.1 实验验证

由 UV-LIGA 工艺制作的拉伸实验用镍质平面 S 型微弹簧(如图 5 所示)的结构参数为: $W = 1.09 \text{ mm}$ 、 $Q = 0.15 \text{ mm}$ 、 $H = 0.08 \text{ mm}$ 、 $D = 0.2 \text{ mm}$ 、 $n = 7$ 。

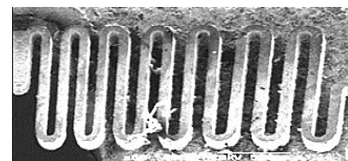


图 5 镍质平面 S 型微弹簧电镜照片

图 6 为实验用 MTS Tytron 微小力测试系统,其最小施加载荷为千分之一牛顿,伸长分辨力达0.1 μm。



图 6 MTS Tytron 250 微小力测试系统

拉伸实验得到微弹簧的力学性能曲线,基本为线性,如图 7 所示。经最小二乘法处理后,得到其拉伸测试刚度为 453 N/m。

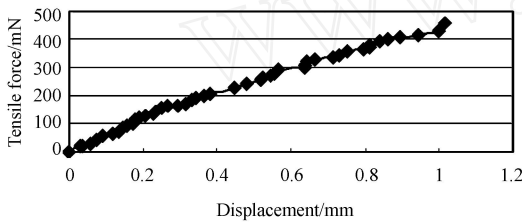


图 7 镍质平面 S 型微弹簧拉力—伸长曲线

2.2.2 仿真验证

同时,利用有限元模拟工具——ANSYS 对该微弹簧进行了拉伸模拟计算以预测其刚度特性。元素模型采用 PLANE82 单元和 SOLID95 单元。图

8 为该微弹簧在 500 mN 拉力作用下的模拟结果,其伸长量为 1.135 mm。

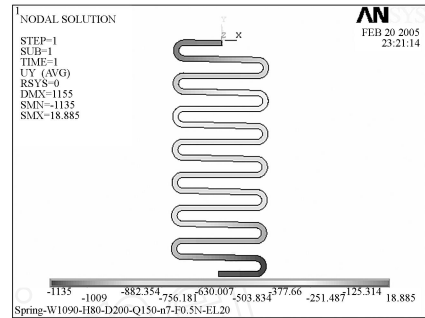


图 8 ANSYS 拉伸模拟结果

将以上两种方法和由式 (4) 得到的结果列成表 1。从表中可以看出模拟得到的刚度、公式计算得到的刚度与测试得到的刚度相比误差在 5% 范围内。可见,在微弹簧弹性范围内仿真模拟和公式计算的结果均与测试结果吻合较好。

表 1 微弹簧刚度结果比较

弹簧类型	测试刚度	模拟刚度	计算刚度
平面 S 型镍	453 N/m	441 N/m	445 N/m

2.3 W 型微弹簧刚度系数计算公式导出

导出方法同 S 型微弹簧,具体过程参见文献 [5]。在此只给出结果,即 W 型微弹簧刚度系数计算公式为:

$$k = EI \left\{ 4h \left[\begin{aligned} &\frac{2}{3} L [16(A+C)^2 + A(2A+C)] + R_{11} [10(A+C)^2 + R_{11}^2 J - 2ABR_{11}] \\ &+ \frac{1}{8} R_{22} \left\{ [2(4A+4C+A_1)^2 + 2(4A+4C+C_1-A_1)^2 + R_{22}^2 + A_1^2 + B_1^2] \right. \\ &\quad \left. + 8[(4A+4C+C_1-A_1)(A_1+B_1) - (4A+4C+A_1)(A_1-B_1)] \right\} \\ &+ \frac{1}{2} L_2 [4(A+C) + A_1 + B_1] [4(A+C) + A_1 + B_1 + C_2] + \frac{1}{3} C_2^2 \\ &+ \frac{1}{6} L_1 [48(A+C)^2 + C_1(12A+12C+C_1)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中

$$R_{11} = R_1 + \frac{H}{2}, R_{22} = R_2 + \frac{H}{2}, A = R_{11} \cos \frac{\alpha}{2}, B = R_{11} \sin \frac{\alpha}{2}, C = \frac{L}{2} \sin \frac{\alpha}{2}, A_1 = R_{22} \cos \frac{\alpha}{2}, B_1 = R_{22} \sin \frac{\alpha}{2}, L_1 = (Q+H) \cot \frac{\alpha}{2}, C_1 = L_1 \sin \frac{\alpha}{2}, L_2 = Q - 2R_2, C_2 = L_2 \cos \frac{\alpha}{2}$$

3 两种 MEMS 弹簧性能比较分析

平面 S 型与 W 型 MEMS 弹簧的结构特点决定了它们力学性能的差异。下面以同样的外廓尺寸及相同的线宽、梁间距、厚度为前提条件,通过定性和定量两个方面对它们的刚度特性进行分析。

3.1 定性分析

通过 S 型与 W 型微弹簧的结构定义可知,对刚度影响较大的部分主要在中间梁段,二者结构的差异也主要在中间梁段,S 型是直梁,W 型是弯梁。而它

们的端部弯梁结构相似。因此,取中间梁段并且其垂直投影长度相等,即 OA = OB = l, 0 < α < 90°,并在端部施加力 P 来分析它们的刚度大小,如图 9 所示。

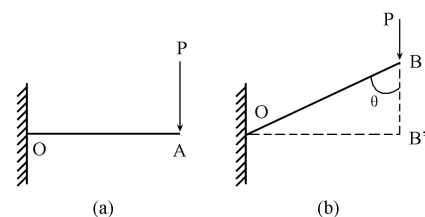


图 9 垂直投影长度相等的直梁和弯梁结构受力示意图

根据卡氏第二定理,图 9(a)中直梁的垂直位移为

$$S_{直} = Fl^3 / 3EI \tag{6}$$

其刚度为

$$K_{直} = \frac{3EI}{l^3} \tag{7}$$

图 9(b)中弯梁的垂直位移为 $S_{弯} = \frac{Fl^3}{3EI \sin}$,其刚度为

$$K_{弯} = \frac{3EI \sin}{l^3} \tag{8}$$

因为直梁与弯梁的线宽及厚度均相等,即式(7)和式(8)中的 E 和 I 均相等,而且, $0 < \sin < 1$ ($0 < < 90^\circ$),所以, $K_{直} > K_{弯}$,即在同样的外廓尺寸及相同的线宽、梁间距、厚度情况下,平面 S 型微弹簧的刚度大于平面 W 型微弹簧的刚度。

3.2 定量分析

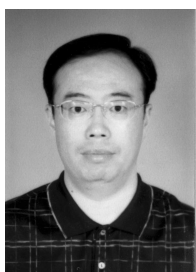
定量分析是以具体数值分别代入两种微弹簧刚度系数计算公式进行计算,来比较在同样的外廓尺寸及相同的线宽、梁间距、厚度情况下,平面 S 型微弹簧的刚度与平面 W 型微弹簧的刚度大小情况。

用来计算的 W 型微弹簧结构尺寸如表 2 所示。由式(5)计算得其刚度系数为 $K_{弯} = 260 \text{ N/m}$ 。

表 2 W 型微弹簧结构尺寸 单位:mm、节

L	H	Q	D	R ₁	R ₂	n	
0.2115	0.055	0.055	0.3	120°	0.05	0.02	8

经计算,其总长为 1.93 mm,总宽 1.1 mm。由此可推出与其外廓尺寸总长、总宽相等的 S 型微弹簧结构尺寸如表 3 所示。利用式(4)计算得该 S 型微弹簧的刚度系数为 $K_{直} = 393.93 \text{ N/m}$ 。



何 光(1968-),男,北京理工大学机电工程与控制国家级重点实验室讲师,博士,主要从事机电系统设计与集成及引信技术研究,heguang @bit.edu.cn.



石庚辰(1950-),男,北京理工大学机电工程与控制国家级重点实验室教授,博士生导师,主要从事机电系统技术、传感与检测技术等方面的研究。

表 3 S 型微弹簧结构参数 单位:mm、节

W	Q	H	D	n
0.935	0.055	0.055	0.3	8.5

可见, $K_{直} > K_{弯}$,由此再次说明,在同样的外廓尺寸及相同的线宽、梁间距、厚度情况下,平面 S 型微弹簧的刚度大于平面 W 型微弹簧的刚度。

4 结论

本文通过理论分析、仿真计算和实验验证方法对平面镍质 S 型与平面 W 型 MEMS 弹簧刚度特性进行了比较研究,得出了在同样的外廓尺寸及相同的线宽、厚度和梁间距情况下,平面 S 型微弹簧的刚度大于平面 W 型微弹簧的刚度的结论。

因此,在设计微弹簧时,当系统空间有限而又需要较大刚度的微弹簧时,可优先采用 S 型结构;当需要微弹簧有较大伸长,刚度又较小时可优先采用 W 型结构的平面微弹簧。

参考文献:

- [1] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micro-Machined Inertial Sensors [C]// IEEE. Proceedings of IEEE. New York, USA: IEEE Press,1998,86 (8):1640-1659.
- [2] Raanan A Miller, Yu Chongtai. Micro-Machined Electromagnetic Scanning Mirrors [J]. Optical Engineering, 1997, 36 (5):1399-1407.
- [3] Agel D J. Materials and Processes for Microsystems[J]. Surface and Coatings Technology,1998,32 (3):103-104.
- [4] 范钦珊. 材料力学 [M]. 北京:高等教育出版社,2000,319-324.
- [5] 何光,石庚辰. 基于 MEMS 技术的平面 W 型微弹簧刚度特性研究[J]. 北京理工大学学报,2006,(6):471-474.