

一种用于微谐振器频率调节的静电梳齿结构设计*

许 立,董林玺,王 威

(杭州电子科技大学 微电子 CAD 研究所,浙江 杭州 310018)

摘要:针对微梳齿谐振器频率偏移的问题,提出了一种用于微谐振器频率调节的曲线形状静电梳齿结构。通过对梳齿简单模型的静电力分析,得出其静电力-位移特性,其斜率就是静电弹性系数;然后从谐振频率出发,分析了影响谐振频率的因素。研究表明,对于梳齿式微谐振器,当调谐电压从 0 V 变化到 80 V 左右时,器件的有效弹性系数从 2.64 N/m 减小到 1.23 N/m 左右,且谐振频率从自然谐振频率 18.9 kHz 减小到 13 kHz,降幅分别为 53% 和 31%。实验结果表明,这种曲线梳齿“软化”了静电微谐振器或者微驱动器的系统弹性,能够有效地调节谐振频率。

关键词:梳齿;频率调节;微谐振器;有效弹性系数

中图分类号:TH703

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)07-0100-04

Design of electrostatic comb actuator for frequency tuning of micro resonator

XV Li, DONG Lin-xi, WANG Wei

(Microelectronic CAD Center, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the frequency offset of comb micro resonator, a curved-shaped electrostatic comb structure was posed for frequency tuning of micro resonator. Electrostatic force-engagement response was derived from a simple comb finger model and the slope of the response was electrostatic stiffness. The influences on tuning resonant frequency was analyzed. The results indicate that, for comb micro resonators, when tuning voltage is changed from 0 V to 80 V, effective stiffness of the device is decreased from 2.64 N/m to 1.23 N/m and the resonant frequency is decreased from natural frequency (18.9 kHz) to 13 kHz, dropping 53% and 31% respectively. The results indicate that the presented curve comb can soften the stiffness of electrostatic resonator or micro actuator so as to tune resonant frequency effectively.

Key words: comb finger; frequency tuning; micro resonator; effective stiffness

0 引 言

伴随着微机械结构加工技术的发展而诞生的微机电系统 (MEMS),对传统的机电产业产生了深远的影响。Tang 等在 1989 年首次提出了静电梳齿驱动结构 (electrostatic comb-drive actuators)^[1],由于结构简单,并与集成电路工艺兼容,静电梳齿结构作为驱动部件 (执行器)或检测部件 (传感器),已在微机电系统中得到广泛的应用。如梳齿结构应用于光开关^[2]、微机械滤波器^[3]等。

对于梳齿式谐振器而言,一些装置需要器件产生

特定的、准确的谐振频率 (如在时钟电路或者滤波器中)。但是由于受到温度、阻尼、材料、封装等一系列因素的影响,器件的谐振频率会有一定程度的漂移,因此需要对器件的谐振频率进行微小的调整。频率调节的方法有多种,如用热应力改变刚度^[4],后处理中的材料沉积^[5]等。

本研究首先建立一种通用的梳齿结构侧面二维模型。对曲线梳齿的静电力与谐振频率进行静态及动力学分析,确定影响谐振频率的因素,并将理论计算结果与 Ansoft 有限元软件三维仿真结果进行比较。对于有曲线调谐梳齿的微谐振器,当改变调谐电压时,器件的

有效弹性系数会发生相应的变化,从而谐振频率会发生改变,有效调节谐振频率。

1 谐振器的谐振频率以及曲线梳齿

典型的梳齿式微谐振器结构示意图如图 1 所示,一般是由固定梳齿电极、可动梳齿、质量块和结构支撑部分组成。当在电极之间施加驱动电压时,梳齿之间产生静电力,振子发生位移,使折叠梁产生形变,当驱动电压产生的静电激励力的频率和谐振器的固有频率接近时,系统就发生谐振。

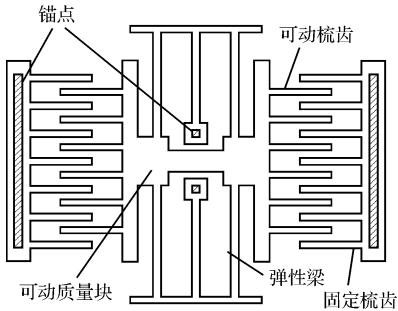


图 1 微梳齿谐振器结构示意图

1.1 梳齿解析模型

传统的驱动梳齿都是矩形结构的,加上激励后所得到的横向静电力为一恒定值,与梳齿位移无关。为了得到线性的梳齿位移-静电力的特性而调节谐振器的谐振频率, Lee 等提出过一种调节频率的梳齿结构,其中固定梳齿为曲线型而运动梳齿为矩形,用于折叠弹性梁结构的梳齿式谐振器^[6]。本研究在此基础上,

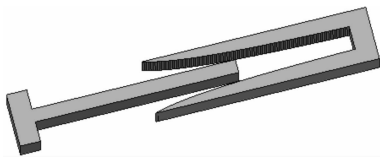


图 2 三维曲线形状梳齿结构示意图

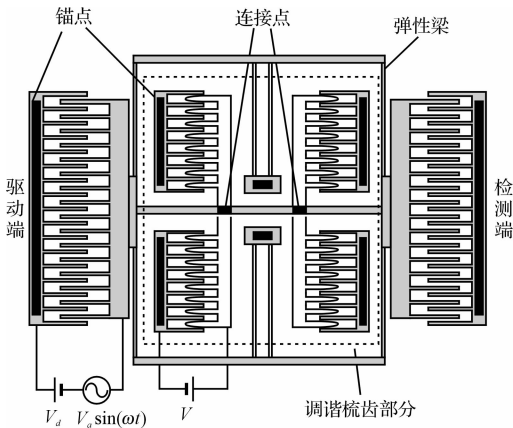


图 3 具有频率调节功能的梳齿式谐振器示意图

通过将运动梳齿设计为曲线型而保持固定梳齿为传统的矩形,提出另一种改变静电梳齿式微谐振器频率的结构,将这种结构的梳齿作为调谐梳齿,应用在直角型梳齿式微谐振器中,通过改变调谐梳齿上电压 V 的值,来达到调节谐振器谐振频率的目的,梳齿三维结构及梳齿式微谐振器整体应用如图 2 和图 3 所示。

首先,用一种普遍适用于任何形状梳齿的简单模型,来求出曲线梳齿结构的位移-静电力响应特性^[7],模型如图 4 所示。

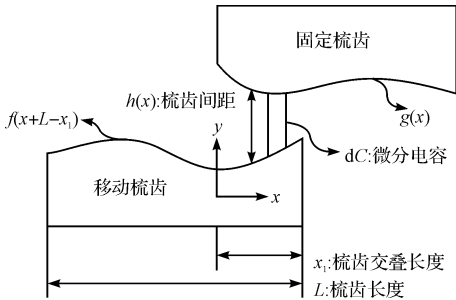


图 4 任意形状的梳齿结构简单模型

$f(x), g(x)$ —移动梳齿和固定梳齿的侧面函数; L —梳齿的长度; x_1 —梳齿交叠的长度

若在动齿和固齿之间加上恒定电压 V ,则两梳齿上的电荷为 $Q = CV, C$ 为电容量,则梳齿上存储的静电能为^[8]:

$$W = \frac{CV^2}{2} = \frac{QV}{2} \tag{1}$$

应用虚位移原理,梳齿间横向的静电力可以由静电场储存的势能对振动方向 x 求导得到:

$$F_x = \frac{dW}{dx_1} = \frac{V^2}{2} \frac{dC}{dx_1} \tag{2}$$

式中 x_1 —梳齿交叠长度。

因此,可以通过计算电容变化和梳齿横向位移来得到所需的静电力。利用平行板电容器的电容近似法可以得到 x_1 长度位移时的梳齿模型的电容值为^[9]:

$$C(x_1) = 2\epsilon_0 t \int_0^{x_1} \frac{1}{g(x) - f(x + L - x_1)} dx \tag{3}$$

式中 t —梳齿的厚度; ϵ_0 —真空介电常数。

这种方法就是将不规则的梳齿看成是无限多平行板电容器,然后通过积分的方法得到其整个近似电容值。其中因子“2”代表对称的上下两个梳齿。

对于仅仅移动梳齿是矩形的情况来说,其侧面函数 $f(x) = m$,为一个常数,将式(3)代入式(2)可得到静电力:

$$F_x = \frac{\epsilon_0 V^2 t}{g(x_1) - m} = \frac{\epsilon_0 V^2 t}{h(x_1)} \tag{4}$$

这里 $h(x_1)$ 实质上表示的是梳齿之间的间距。

对于曲线梳齿,其中的移动梳齿仍为矩形形状,而固定梳齿的侧面内侧为一段曲线,曲线的形状可以控制。这里给出梳齿的具体结构属性,如表 1 所示。

表 1 曲线梳齿的结构属性

属性	参数值
梳齿厚度 $t/\mu\text{m}$	4
梳齿个数 n	186
梳齿长度 $L/\mu\text{m}$	30
有效质量 m_e/kg	1.85×10^{-10}
移动梳齿 $f(x), x \in (0, 30)$	$f(x) = 1$
机械弹性系数 $k_s/(\text{N/m})$	2.64
固定梳齿 $g(x), x \in (0, 30)$	$g(x) = \frac{30}{x+10} + 1$
自然谐振频率 f_0/kHz	18.9

将表 1 里的参数代入到式(4),可以得到曲线梳齿的横向静电力的表达式为:

$$F_x = \frac{\varepsilon_0 V^2 t}{g(x_1) - m} = \frac{\varepsilon_0 V^2 t}{h(x_1)} = \frac{\varepsilon_0 V^2 t}{30} (x_1 + 10) \quad (5)$$

1.2 谐振器的频率调节

对于一个有着 n 个梳齿,且梳齿间电压为 V 的谐振器来说,其静电弹性系数 k_e 为横向静电力在 x 方向上的导数值:

$$k_e = n \frac{\partial F_x}{\partial x_1} = n \varepsilon_0 V^2 t \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{1}{h(x_1)} \right) = \frac{n \varepsilon_0 V^2 t}{30} = \beta V^2 \quad (6)$$

其中:

$$\beta = \frac{n \varepsilon_0 V^2 t}{30} \quad (7)$$

则谐振器的有效弹性系数 k_{eff} 可以表示为:

$$k_{\text{eff}} = k_s - k_e = k_s - \beta V^2 \quad (8)$$

式中 k_s —谐振器的机械弹性系数。

可见,有效弹性系数与调谐电压的平方成比例,会产生一个线性的动态位移响应。将式(6)和式(7)代入式(5)就可得到受调谐频率 V 影响的谐振器的谐振频率:

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{eff}}}{m_e}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s - \beta V^2}{m_e}} = f_0 \sqrt{1 - \frac{\beta V^2}{k_s}} \quad (9)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_s}{m_e}} \quad (10)$$

式中 f_0 —谐振器的自然谐振频率。

从以上分析可以看出,若在谐振器上加一个调谐梳齿阵列,通过改变谐振器的静电弹性系数,也可调节系统的有效弹性系数,进而调节微谐振器的谐振频率。

2 Ansoft 有限元模拟仿真

Ansoft 有限元软件是 Ansoft 公司一款电磁场仿真软件,本研究中主要利用其中的 Maxwell 3D 静电分析模块,对静电梳齿结构模型进行仿真分析。

在 Ansoft 求解设置中,百分误差设为 5%,单次迭代精度为 50%,迭代次数为 10 次,取单个梳齿的交叠长度 $5 \mu\text{m}, 7 \mu\text{m}, 9 \mu\text{m}, 11 \mu\text{m}, 13 \mu\text{m}, 15 \mu\text{m}, 17 \mu\text{m}, 19 \mu\text{m}, 21 \mu\text{m}, 23 \mu\text{m}, 25 \mu\text{m}$,驱动电压 1 V,进行 Ansoft 仿真,得到单个曲线梳齿静电力-位移响应如图 5 所示,和计算结果基本吻合。

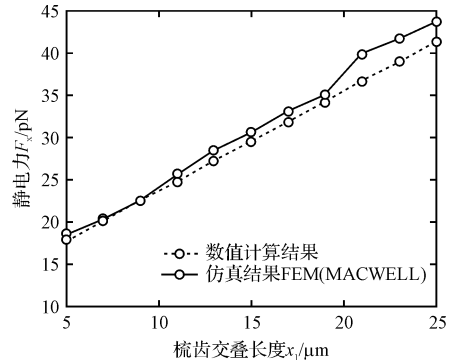


图 5 曲线梳齿的静电力-位移响应

曲线梳齿静电力-位移响应如图 5 所示,位移从 $x_1 = 5 \mu\text{m} \sim 25 \mu\text{m}$,数值计算结果和仿真结果的斜率值约为 $1.18 \text{ N/m}^2 \text{V}^2$ 和 $1.25 \text{ N/m}^2 \text{V}^2$,显示出良好的线性特性。

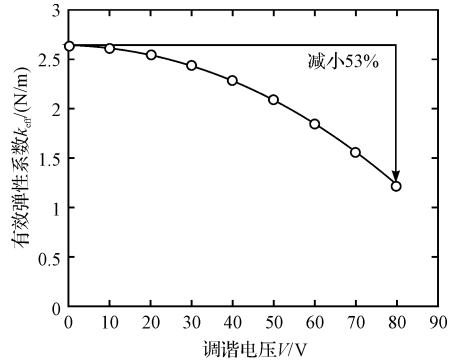


图 6 随调谐电压增加而变化的有效弹性系数

将调谐电压从 0 V 增加到 80 V,发现谐振器的有效弹性系数 k_{eff} 从原来的 2.64 N/m 下降到 1.23 N/m ,降幅约为 53%,说明通过调节调谐电压,这种曲线调谐梳齿能减小系统的有效弹性系数,达到“软化”系统弹性的目的。

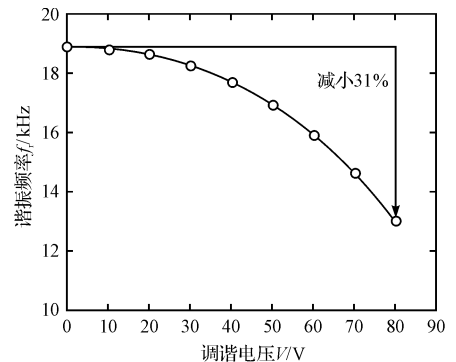


图 7 随调谐电压增加而变化的谐振频率

将调谐电压从 0 V 增加到 80 V,发现谐振器的谐振频率 f_r 从原来的自然谐振频率 $f_0 = 18.9$ kHz 减小到 13 kHz,减小了将近 31%,所以,通过改变调谐电压,用曲线调谐梳齿可以调节谐振器的谐振频率。但是对于这种形状的曲线梳齿,只能调节谐振频率使其值减小。

3 结束语

本研究提出了一种可用于微谐振器频率调节的曲线梳齿结构。在微谐振器上加上这种曲线调谐梳齿,可以通过改变梳齿上的调谐电压,来改变谐振器的有效弹性系数,进而改变谐振频率。结果表明,有效弹性系数与调谐电压的平方成比例,产生一个线性的动态位移响应。对于一个有着 186 个梳齿的微梳齿谐振器,当调谐电压从 0 V 变化到 80 V 左右时,器件的有效弹性系数从 2.64 N/m 减小到 1.23 N/m,且谐振频率从初始自然谐振频率 18.9 kHz 减小到 13 kHz,降幅分别为 53% 和 31%。因此,将这种曲线梳齿用作为调谐梳齿,能有效调节微谐振器的谐振频率。

这种曲线梳齿的作用是“软化”谐振器的弹性,即通过改变调谐电压,减小谐振器的谐振频率,但不能增大。在曲线结构尺寸设计时,梳齿间距过小,梳齿边缘效应、梳齿吸合等问题对器件有着较大影响,在以后的工作中需要进一步深入。

参考文献 (References):

- [1] TANG W C, NGUYEN T H, HOWE R T. Laterally Driven Polysilicon Resonant Microstructures [C]//IEEE Microelec-

tro Mech. Syst. Workshop. Salt Lake City: [s. n.], 1989: 53 – 59.

- [2] KIANG M H, SOLGAARD O, LAU K Y, et al. Polysilicon optical microscanners for laser scanning displays [J]. **Sensors Actuators**, 1998, A(70): 195 – 199.
- [3] BANNON F D, CLARK J R, NGUYEN C T. High-HF microelectromechanical filters [J]. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 2000, 35(4): 512 – 526.
- [4] RICHARD R A S. Electrothermal frequency tuning of folded and coupled vibrating micromechanical resonators [J]. **Journal of Microelectromechanical Systems**, 1998, 7(2): 164 – 171.
- [5] CHIAO M, LIN L. Post-Packaging Tuning of Microresonators by Pulsed Laser Deposition [C]//12th Int. Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems. Boston: [s. n.], 2003: 1820 – 1823.
- [6] LEE K B. A closed-form approach for frequency tunable comb resonators with curved finger contour [J]. **Sensors and Actuators A**, 2008, 141(1): 523 – 529.
- [7] YE W J, MUKHERJEE S. Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems [J]. **Journal of Microelectromechanical System**, 1998, 7(1): 16 – 26.
- [8] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 67 – 73.
- [9] JENSEN B D. Shaped comb fingers for tailored electromechanical restoring force [J]. **Journal of Microelectromechanical System**, 2003, 12(3): 373 – 382.

[编辑: 李 辉]

(上接第 68 页)

样性,因此需要建立一个公共接口来对每个热电厂进行自动建模,这是状态估计技术在热电系统中进行应用的前提,也是下一步主要的研究内容。

参考文献 (References):

- [1] 王 柳, 章坚民. 省级地方电厂管理信息系统通信子系统设计与实现 [J]. 杭州电子科技大学学报, 2008, 28(4): 25 – 28.
- [2] 李志华, 孙 盼, 章坚民. 多数据集成方式在热电信息采集方面的应用 [J]. 中国水运, 2008, 6(1): 184 – 185.
- [3] 纪 风, 章坚民. 基于热电管理系统的热电厂优化运行的研究 [J]. 机电工程, 2009, 26(2): 63 – 66.
- [4] 戴碧豪, 章坚民. OPC 在地方电厂管理信息系统中的应用

[J]. 计算机系统应用, 2008, 17(12): 128 – 131.

- [5] 李文魁. 电力系统状态估计及不良数据检测与识别研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学信息科学与技术学院, 2004: 5 – 23.
- [6] 于尔铿. 电力系统状态估计 [M]. 1 版. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [7] FRED C S, MICHAEL C C, RICHARD D T, et al. Spot Pricing of Electricity [M]. 5th ed. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2002: 55 – 93.
- [8] 刘喜超, 唐胜利. 基于偏最小二乘法的压气机特性曲线的拟合 [J]. 汽轮机技术, 2006, 48(5): 327 – 329.
- [9] 杨海生, 郭江龙. 汽轮机背压修正曲线计算的简化方法 [J]. 汽轮机技术, 2007, 49(1): 32 – 34. [编辑: 李 辉]