

# 考虑制作工艺和边缘效应的梳齿电容理论

郭占社<sup>1,2</sup>, 冯舟<sup>1,2</sup>, 庄海涵<sup>1,2</sup>, 宋春苗<sup>1,2</sup>, 樊尚春<sup>1,2</sup>

(1. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100091, guozhanshe@buaa.edu.cn;

2. 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**为解决梳齿驱动器中理想计算模型误差较大的问题,利用平板电容理论及微积分方法,对制作工艺及边缘效应的影响进行了分析,并建立相应的计算模型.在此基础上,以加工完毕的梳齿驱动器为研究目标,得到其电容在理想条件下、考虑制造工艺误差及边缘效应条件下的计算结果分别为 1.267 3 pF 和 1.440 3 pF.两者与利用高精度 LCR 测试仪测量所得电容 1.517 2 pF 之间的相对误差分别为 16.47% 和 5.07%.实验结果表明,考虑制造工艺误差及边缘效应时计算结果的精度远远高于理想条件下计算结果的精度,证明了该理论模型的正确性.

**关键词:** MEMS; 梳齿驱动器; 平板电容理论; 边缘效应; 制作工艺

**中图分类号:** TH117.3      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2010)12-2009-04

## Theoretical study on the capacitance of comb actuator considering fabrication technology and edge effect

GUO Zhan-she<sup>1,2</sup>, FENG Zhou<sup>1,2</sup>, ZHUANG Hai-han<sup>1,2</sup>, SONG Chun-miao<sup>1,2</sup>, FAN Shang-chun<sup>1,2</sup>

(1. School of Instrument Science & Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China, guozhanshe@buaa.edu.cn; 2. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing 1000083, China)

**Abstract:** With plate capacitor theory and calculus method, the capacitance of micro electro-mechanical system (MEMS) electrostatic comb actuator is studied. Considering the affections of fabrication technology and edge effect, a calculating model is built, by which the calculations for the fabricated comb actuator are carried out under the ideal condition and the condition of considering border effect and fabricating technology. The calculated results are 1.267 3 pF and 1.440 3 pF respectively, of which the relative errors with the high precision LCR device measured value 1.517 2 pF are 16.47% and 5.07%. This indicates that the model can be used to get higher precision, if the border effect and fabrication process are taken into account.

**Key words:** MEMS; comb actuator; plate capacitor theory; edge effect; fabrication technology

静电梳齿驱动结构最早由 Tang 等<sup>[1]</sup>在 1989 年提出,最初是用于微谐振器.由于结构简单、与集成电路工艺兼容等优点,梳齿驱动器一直是 MEMS 领域最主要的驱动源,被广泛应用于各种 MEMS 器件中,例如微加速度计<sup>[2]</sup>、微陀螺<sup>[3]</sup>等.

目前,国内外对 MEMS 梳齿驱动器的研究,大多都采用了理想情况下的计算公式<sup>[4-5]</sup>,然而,

由于制作工艺误差和边缘效应的影响,实际检测结果与理想情况下的计算结果之间存在较大差异<sup>[6-7]</sup>.因此,针对 MEMS 领域在实际应用中的需要,对于影响梳齿驱动器的若干因素进行研究,得到高精度梳齿驱动器电容计算模型显得至关重要.本文考虑影响梳齿驱动器电容计算精度的重要因素,推导得到包含制造工艺误差和边缘效应的计算公式.实验证明,相对于理想情况下的计算公式,该公式具有较高的精度,可以满足 MEMS 领域实际应用的需要.

收稿日期: 2009-04-11.

基金项目: 航空基金项目(2008ZC51034);

北京航空航天大学青年创新基金支持项目.

作者简介: 郭占社(1973—),男,副教授.

# 1 梳齿驱动器电容计算

## 1.1 梳齿驱动原理

梳齿驱动器的结构示意图如图 1 所示,主要由可动梳齿、固定梳齿、支撑梁、固定岛和底平面等 5 部分组成. 可动梳齿与可动电极极板连成一体, 固定梳齿与固定电极极板相连. 可动电极极板通过支撑梁与固定岛相接, 固定于衬底上, 并且通过中间的固定岛和支撑梁使整个可动梳齿平板悬空, 从而减小结构的摩擦阻力. 在检测端与可动梳齿结构间加上直流偏置电压  $U_p$ , 在驱动端与可动梳齿结构间加上交流驱动电压  $U_d$ . 在梳齿间的静电力作用下, 可动电极极板沿平行于衬底的方向移动, 使支撑梁发生变形, 同时梳齿的交叠面积发生变化, 使得电容  $C$  也发生变化.

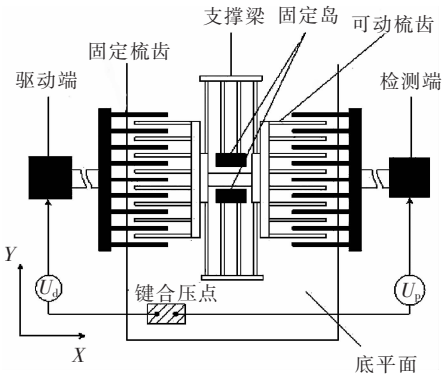


图 1 梳齿驱动器结构示意图

由工作原理可以看出, 电容的精确计算对于 MEMS 传感器中梳齿驱动器的性能研究具有重要意义.

## 1.2 理想条件下的电容计算

目前, 对于梳齿驱动器电容量的研究, 国内外大多基于理想条件, 即认为相邻梳齿所构成电容器的电容计算可以利用理想的平板电容计算公式, 即

$$C = \frac{\varepsilon ab}{d}. \quad (1)$$

其中:  $\varepsilon$  为介电常数,  $a$  为梳齿宽度,  $b$  为相邻梳齿的重叠长度,  $d$  为相邻梳齿的间距.

然而, 由于受到制作工艺误差及边缘效应等因素的影响, 理想情况与实际情况之间存在较大误差. 因此, 必须依据实际情况, 推导得到考虑各种影响因素的高精度梳齿驱动器电容计算公式.

## 1.3 考虑梳齿与垂直面间夹角的电容计算

由于制作工艺的影响, 实际制作得到的 MEMS 器件与理想模型之间存在一定的误差. 其中, 梳齿表面轮廓的不平整度主要影响其机械学

特性, 而梳齿与垂直面间的微小夹角主要影响其电学特性. 因此, 本文主要研究了梳齿与垂直面间的微小夹角对于计算精度的影响.

理想的梳齿驱动器中梳齿的垂直度为  $90^\circ$ , 然而受蚀刻工艺所限, 实际制作的驱动器存在一定误差, 即梳齿与垂直面之间存在一个微小夹角. 一对相邻梳齿的截面示意图如图 2 所示.

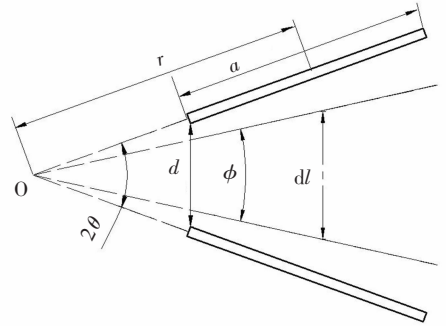


图 2 相邻梳齿的截面示意图

设相邻梳齿的延长线交于点  $O$ , 夹角为  $2\theta$ . 在其间取两个间距无限小的平面, 设间距为  $dl$ , 根据物理学定义, 可将该微元看作理想的平板电容, 则其电容

$$C_i = \frac{\varepsilon ab}{dl} = \frac{\varepsilon ab}{r \cdot d\phi}.$$

对上式在  $[0, 2\theta]$  内积分, 得到相邻梳齿所构成电容器的电容

$$C = \int_0^{2\theta} \frac{\varepsilon ab}{r \cdot d\phi} = \frac{\varepsilon ab}{r \cdot \int_0^{2\theta} d\phi} = \frac{\varepsilon ab}{2r\theta}.$$

由几何关系可得  $r = \frac{a}{2} + \frac{d}{2\sin\theta}$ , 则

$$C = \frac{\varepsilon ab}{\left(a + \frac{d}{\sin\theta}\right)\theta}. \quad (2)$$

## 1.4 考虑边缘效应的电容计算

梳齿驱动器中, 梳齿的长度和宽度大于相邻梳齿间距的程度有限. 因此, 根据平板电容理论, 其在两个方向上的边缘效应都不可忽略, 即相邻梳齿间的电场线只在中央区域近似于直线, 越靠近边缘处的电场线向外凸出弯曲的程度越大. 相邻梳齿截面的电力线分布示意图如图 3 所示.

考虑边缘效应时, 研究平板电容计算公式的方法主要有保角变换、施瓦兹多角变换、求解电场分布的拉普拉斯方程等, 其结果都是理想计算公式与修正项之和. 其中, 最为精确的是利用保角变换推导得到的计算公式<sup>[8]</sup>

$$C = \frac{\varepsilon ab}{d} + \frac{\varepsilon a}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[ 1 + \frac{2\pi b}{d} + \right. \right.$$

$$\ln\left(1 + \frac{2\pi b}{d}\right)\}.$$

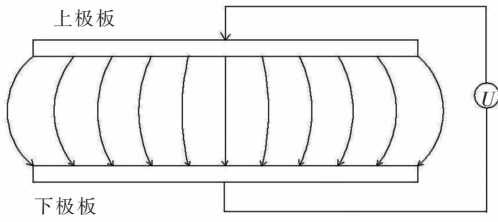


图 3 相邻梳齿截面的电场线分布示意图

对于梳齿驱动器,必须同时考虑两个方向上的边缘效应.因此,相邻梳齿所构成电容器的电容

$$C = \frac{\varepsilon ab}{d} + \frac{\varepsilon a}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[ 1 + \frac{2\pi b}{d} + \ln \left( 1 + \frac{2\pi b}{d} \right) \right] \right\} + \frac{\varepsilon b}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[ 1 + \frac{2\pi a}{d} + \ln \left( 1 + \frac{2\pi a}{d} \right) \right] \right\}. \quad (3)$$

### 1.5 考虑制作工艺和边缘效应的电容计算

实际应用的 MEMS 传感器中,梳齿驱动器电容同时受到制作工艺误差和边缘效应的影响,其与理想情况之间的误差是这两方面影响综合作用的结果.因此,为实现高精度计算,必须综合考虑两方面的影响.

依据式(2)和式(3),推导得到考虑制作工艺误差和边缘效应的梳齿驱动器电容计算公式为

$$C = \frac{\varepsilon ab}{\left(a + \frac{d}{\sin\theta}\right)\theta} +$$

$$\frac{\varepsilon a}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[ 1 + \frac{2\pi b}{\left(a + \frac{d}{\sin\theta}\right)\theta} + \ln \left( 1 + \frac{2\pi b}{\left(a + \frac{d}{\sin\theta}\right)\theta} \right) \right] \right\} +$$

$$\frac{\varepsilon b}{\pi} \left\{ 1 + \ln \left[ 1 + \frac{2\pi a}{\left(a + \frac{d}{\sin\theta}\right)\theta} + \ln \left( 1 + \frac{2\pi a}{\left(a + \frac{d}{\sin\theta}\right)\theta} \right) \right] \right\}. \quad (4)$$

由于梳齿驱动器中每一对相邻梳齿所构成的电容器完全相同,且构成并联关系,所以其电容之和即为梳齿驱动器的电容.

## 2 实验验证

为验证理论模型正确性,利用高精度 LCR 测试仪(Agilent E4980A),对在同一工艺条件下,同一个加工批次制作得到的硅 MEMS 陀螺质量块上的梳齿驱动器的电容进行了测试,陀螺及被测梳齿驱动器的显微图片如图 4 所示.为减小测试过程中的偶然误差,共选取了 3 个样品,且每个样品均进行了 3 次测试.该陀螺质量块上的梳齿驱动器共有梳齿 180 个,尺寸参数如表 1 所示.

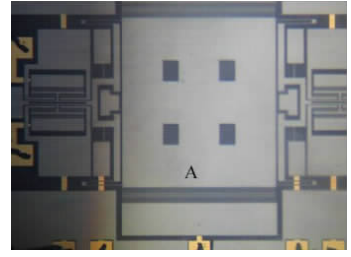


图 4 MEMS 陀螺显微图片

表 1 梳齿驱动器的尺寸数据

长度 / $\mu\text{m}$	宽度 / $\mu\text{m}$	重叠长度 / $\mu\text{m}$	间隙 / $\mu\text{m}$	厚度 / $\mu\text{m}$	夹角 / $(^\circ)$
100	72	50	4.5	4	0.5

利用式(1)和式(4),得到该驱动器在理想条件下及考虑制造工艺误差和边缘效应条件下的计算结果分别为  $C_{id} = 1.2673 \text{ pF}$ ,  $C_{re} = 1.4403 \text{ pF}$ .

利用高精度 LCR 设备测试得到的结果如表 2 所示.

表 2 梳齿驱动器电容测量值

实验	电容/ $\text{pF}$		
	1号陀螺	2号陀螺	3号陀螺
第 1 次	1.64	1.63	1.49
	1.65	1.63	1.49
	1.52	1.52	1.34
	1.52	1.52	1.34
第 2 次	1.63	1.61	1.49
	1.63	1.61	1.50
	1.52	1.50	1.34
	1.52	1.50	1.34
第 3 次	1.62	1.61	1.49
	1.62	1.61	1.48
	1.52	1.50	1.34
	1.51	1.50	1.34

依据误差理论与数据处理相关知识,可求得电容的平均值

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n} = \sum_{i=1}^{36} \frac{C_i}{36} = 1.5172 \text{ pF}.$$

样本平均值的标准偏差

$$\bar{\delta} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(C_i - \bar{C})^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{36} \frac{(C_i - \bar{C})^2}{36 \times 35}} = 0.0163.$$

因此,梳齿驱动器的电容为

$$C = \bar{C} \pm 3\bar{\delta} = (1.5172 \pm 0.0489) \text{ pF}.$$

该测量结果与在理想条件下及考虑制作工艺误差和边缘效应条件下计算得到的结果之间的相对误

差为

$$\delta_1 = \frac{|C - C_{id}|}{C} \times 100\% = 16.47\%, \quad (5)$$

$$\delta_2 = \frac{|C - C_{re}|}{C} \times 100\% = 5.07\%. \quad (6)$$

通过比较式(5)及式(6)计算得到的结果可看出,考虑边缘效应及制作工艺条件得到的计算结果,相对于理想条件得到的结果,具有更高的计算精度,说明了该理论的正确性.

### 3 结 论

1)通过研究影响梳齿驱动器电容计算精度的主要因素,推导得到了考虑制作工艺误差和边缘效应的梳齿驱动器电容计算公式.依据实际制作得到 MEMS 谐振音叉式陀螺上梳齿驱动器的尺寸数据,得到理想计算公式和实际公式的计算结果分别为 1.267 3 pF 和 1.440 3 pF,与利用专用阻抗测试仪器测量得到的电容量 1.517 2 pF 之间的误差分别为 16.47% 和 5.07%.

2)考虑制造工艺误差和边缘效应的梳齿驱动器电容计算公式具有较高精度,说明对于 MEMS 梳齿驱动器来说,考虑边缘效应及制作工艺条件下建立的理论模型具有更高的计算精度.

### 参考文献:

- [1] TANG W C, NGUYEN T H, HOWE R T. Laterally driven polysilicon resonant structures [C]//Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems. Salt Lake City: IEEE, 1989: 53 - 59.
- [2] MONAJEMI P, AYAZI F. Design optimization and

implementation of a microgravity capacitive HARPSS accelerometer [J]. IEEE Sensor Journal, 2006, 6 (1): 39 - 46.

- [3] ACAR C, SHKEL A M. Inherently robust micromachined gyroscopes with 2-DOF sense-mode oscillator [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2006, 15(2): 380 - 387.
- [4] YANG Zhenchuan, WANG Congshun, YAN Guizhen, *et al.* A bulk micromachined lateral axis gyroscope with vertical sensing comb capacitors [C]//The 13th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Seoul: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society, 2005: 121 - 124.
- [5] HAMAGUCHI H, SUGANO K, TSUCHIYA T, *et al.* A differential capacitive three-axis accelerometer using vertical comb electrodes [C]//The 14th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Lyon: John Wiley and Sons Inc, 2007: 1483 - 1486.
- [6] YE Wenjing, MUKHERJEE S, MACDONALD N C. Optimal shape design of an electrostatic comb drive in microelectromechanical systems [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 1998, 7(1): 16 - 26.
- [7] 董林玺, 车录锋, 王跃林. 梳齿的不平行对电容式微机械传感器可靠工作范围的影响 [J]. 半导体学报, 2005, 26(2): 373 - 378.
- [8] 赵剑, 王洪喜, 贾建援. 计及边缘效应的静电驱动微结构静电力计算 [J]. 微纳电子技术, 2006(2): 95 - 97.

(编辑 魏希柱)