

# 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\*

董林玺<sup>1,2</sup> 车录锋<sup>2</sup> 王跃林<sup>1,2</sup>

(1 浙江大学信息学院信电系, 杭州 310027)

(2 中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

**摘要:** 分析了梳齿电容式传感器梳齿极板间的不平行在三种电容驱动下,对传感器的可靠工作范围的影响. 结果表明梳齿电容在同样的电压驱动下,当电容极板间的倾斜角由 0.1 变到 0.5 时,单边电容结构和双边电容结构的可靠工作范围变为电容极板完全平行时的 0.45,0.56. 对力平衡的双边梳齿电容结构,当倾斜角由 0.1 变到 0.15° 时,可靠工作范围分别变为原来的 0.925. 并针对 DRIE 工艺刻蚀梳齿的原理,讨论了改进方法.

**关键词:** 电容式传感器; 惯性传感器; 可靠工作范围; 脉冲信号

EEACC: 2575; 7230

中图分类号: TN43

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)02-0373-06

## 1 引言

微机械电容式传感器在工作过程中受到惯性力、机械力和测试信号所产生的静电力联合作用. 传感器在工作时如果由于环境变化,如受到脉冲信号的冲击,传感器的振子可能会被吸合而失效. 为了传感器能够可靠工作,研究传感器受冲击的可持续时间或最大可承受冲击幅值是必要的, Bao 等人用能量法<sup>[1]</sup>研究了平行板传感器的受冲击情况. 但是用 ICP 工艺制作的高深宽比的梳齿式传感器,由于工艺的原因,两个极板是不平行的,如图 1 所示. Tayd<sup>[2]</sup>研究了微分电容式传感器中的非平行板效应对传感器灵敏度的影响,但没有分析其对传感器可靠工作范围的影响,下面对该种情况进行分析. 图 2 所示为极板不平行的示意图.

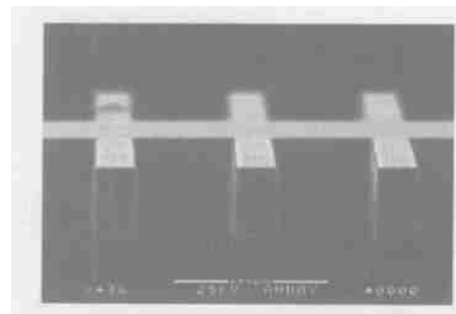


图 1 电容式传感器的梳齿不平行效应的 SEM 照片

Fig. 1 SEM picture of the effect of nonparallel combs of the capacitive micro-sensor

## 2 单边电容驱动

如图 3 所示,当单边驱动时,在可动电极和固定电极两端所加的测试信号电压分别为  $V, 0$ . 设实际情况下极板间的倾斜角为  $\theta$ , 因为梳齿顶端的间距

可以很容易地用 CCD 显微镜测量得到,所以梳齿的间距用顶端间距  $d$  计算,图 2 所示的电容极板单位面积上的电荷为:

$$Q = \frac{0V}{2x} \quad (1)$$

式中  $x$  为板上某点到极坐标原点的距离,如图 2 所示. 用公式  $C = Q/V$ , 得到倾斜板间电容

$$C = \frac{1}{V} \int_{r_1}^{r_2} Q dA = \frac{r_2}{r_1} \int_{\frac{0L}{2x}}^{\frac{0L}{2x}} dx = \frac{0L}{2} \ln \left( \frac{d}{d - 2htan\theta} \right) \quad (2)$$

\*国家重点基础研究发展计划资助项目(批准号:G1999033101)

董林玺 男,1976 年出生,博士研究生,主要研究方向为微机械惯性传感器及其制作技术.

车录锋 男,1970 年出生,博士,副研究员,主要研究方向为微机械惯性传感器及其系统集成.

2004-02-13 收到,2004-05-08 定稿

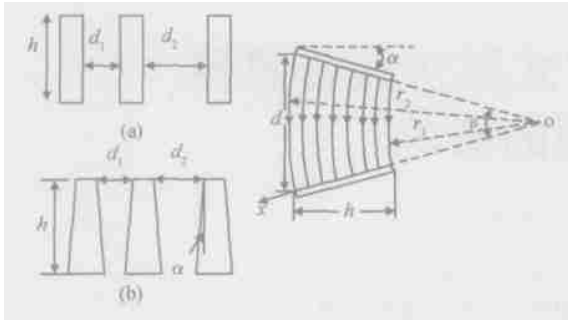


图 2 电容式传感器的梳齿剖面及其电场电力线 (a) 理想情形;(b) 实际情况

Fig.2 Schematic of the cross section of combs of the capacitive sensor and the electrical field curve lines between two combs

式中  $d$  为梳齿间的顶端间距;  $L$  为梳齿的长度;  $h$  为梳齿的厚度.

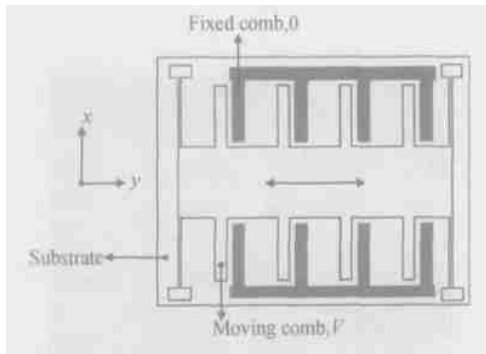


图 3 电容式传感器梳齿的单边驱动

Fig.3 Schematic structure of a single-sided capacitive comb sensor

当敏感质量块有微小位移  $y$  时,对于测试信号有效电压为  $V$  的单边电容结构,系统的势能(相对于状态  $y = 0$ )是  $y$  的函数<sup>[3]</sup>:

$$E(y) = \frac{1}{2} ky^2 - \frac{1}{2} (C(y) - C_0) V^2 \quad (3)$$

式中  $C_0 = C(0) = \frac{\epsilon_0 L}{2} \ln \left[ \frac{d_0}{d_0 - 2h \tan \alpha} \right]$ ,  $C(y) = \frac{\epsilon_0 L}{2} \ln \left[ \frac{d_0 - y}{(d_0 - y) - 2h \tan \alpha} \right]$ , 代入上式中得到单边电容结构的势能为:

$$\frac{1}{2} ma^2(t)^2 = E(y_1) - E(y_0) = \frac{1}{2} kd_0^2 \left( y_1^2 - y_0^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \left[ \ln \frac{D_0(1 - y_1)}{D_0 - y_1} - \ln \frac{D_0(1 - y_0)}{D_0 - y_0} \right] \right) \quad (10)$$

或

$$E(y) = \frac{1}{2} kd_0^2 y^2 - \frac{1}{2} \times \frac{\epsilon_0 L}{2} V^2 \times \ln \left[ \frac{(1 - 2h/d_0 \tan \alpha)(1 - y)}{(1 - 2h/d_0 \tan \alpha) - y} \right] \quad (4)$$

令  $p = \frac{1}{2} \times \frac{\epsilon_0 L h}{d_0} V^2 / kd_0^2 = \frac{F_{c0}}{kd_0}$ ,  $D_0 = 1 - 2h/d_0 \tan \alpha = 1 - 2h/d_0$ ,  $y = y/d_0$ , 上式变为:

$$E(y) = \frac{1}{2} kd_0^2 \left( y^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \ln \left[ \frac{D_0(1 - y)}{D_0 - y} \right] \right) \quad (5)$$

对上式求极值得到:

$$\frac{dE(y)}{dy} = \frac{1}{2} kd_0^2 \left( 2y - 2p \frac{1}{(1 - y)(D_0 - y)} \right) = 0 \quad (6)$$

可得到:

$$y^3 - (1 + D_0)y^2 + D_0y - p = 0 \quad (7)$$

上式中在  $y < 1$  且  $p$  满足不吸合的情况下有两个解. 稳定平衡解  $y_0$ , 不稳定平衡解  $y_1$ , 解可以用数字方法得到, 如当  $p = 0.05$ , 倾斜角为  $0.15^\circ$ , 即  $D_0 = 0.8953$ , 有  $y_0 = 0.064$ ,  $y_1 = 0.67$ .

在冲击信号加到传感器上之前势能为:

$$E(y_0) = \frac{1}{2} kd_0^2 \left( y_0^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \ln \left[ \frac{D_0(1 - y_0)}{D_0 - y_0} \right] \right) \quad (8)$$

如果冲击信号加到传感器上的能量超过了稳定平衡解和不稳定平衡解之间的能量差, 则振子的位置将越过  $y_1$  而被吸合. 设冲击信号的加速度  $a$  足够大, 其持续时间很短, 以至于在冲击结束时引起的振子的位移和速度较小, 即有  $t \ll \sqrt{2}/\omega_0^{[1]}$ , 这样初始条件可用下面近似:

$$\dot{y}_0 = a(t), \quad y_0 = \frac{1}{2} a(t)^2 \quad (9)$$

式中  $a$  为加速度脉冲信号幅值;  $t$  为脉冲持续时间. 器件的可靠工作条件为:

$$a(t) = \frac{1}{d_0} \sqrt{(y_1^2 - y_0^2) - 2p \frac{1}{1 - D_0} \left( \ln \frac{D_0(1 - y_1)}{D_0 - y_1} - \ln \frac{D_0(1 - y_0)}{D_0 - y_0} \right)}$$

对于一幅值为  $ma$  的冲击信号,其持续时间的临界值可用下式计算:

$$t_c = \frac{d_0}{a} f_1(p)$$

$$f_1(p) = \sqrt{(y_1^2 - y_0^2) - 2p \frac{1}{1 - D_0} \left( \ln \frac{D_0(1 - y_1)}{D_0 - y_1} - \ln \frac{D_0(1 - y_0)}{D_0 - y_0} \right)} \quad (11)$$

图 4 为其变化曲线.

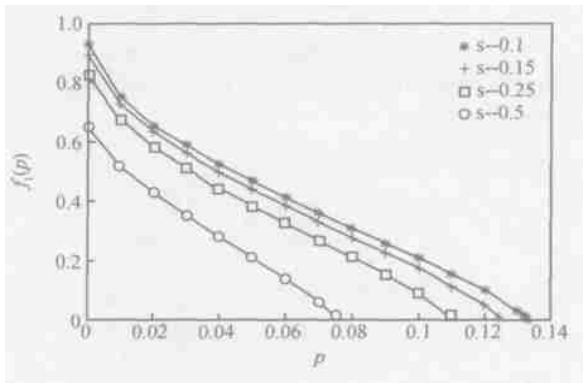


图 4  $f_1(p)$  在不同的倾斜角时随  $p$  的变化

Fig.4 Dependence of  $f_1(p)$  on  $p$  for single-sided capacitive structure for different angle of decline

### 3 双边电容驱动

如图 5 所示,当双边驱动时,在可动电极上加测试信号  $V$ ,在可动电极两端的固定电极上令其测试信号为 0.当振子相对平衡位置有微小位移  $y$  时,双边电容结构的势能:

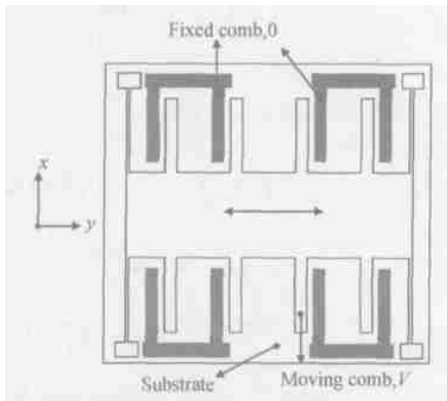


图 5 电容式传感器梳齿的双边驱动

Fig.5 Schematic structure of a double-sided capacitive comb sensor

$$E(y) = \frac{1}{2} ky^2 - \frac{1}{2} ((C_1(y) - C_0) V^2 + (C_2(y) - C_0) V^2) \quad (12)$$

式中

$$C_0 = C(0) = \frac{\epsilon_0 L}{2} \ln \left( \frac{d_0}{d_0 - 2h \tan \alpha} \right),$$

$$C_1(y) = \frac{\epsilon_0 L}{2} \ln \left( \frac{d_0 - y}{(d_0 - y) - 2h \tan \alpha} \right),$$

$$C_2(y) = \frac{\epsilon_0 L}{2} \ln \left( \frac{d_0 + y}{(d_0 + y) - 2h \tan \alpha} \right)$$

把电容代入(12)式中,并把前叙的变量代入得到:

$$E(y) = \frac{1}{2} k d_0^2 \left[ y^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \ln \frac{D_0^2(1 - y^2)}{D_0^2 - y^2} \right] \quad (13)$$

由上式的极值条件得到:

$$y - p \frac{2(1 + D_0)y}{(D_0^2 - y^2)(1 - y^2)} = 0 \quad (14)$$

整理后得到方程:

$$y \frac{y^4 - (1 + D_0^2)y^2 + D_0^2 - 2p(1 + D_0)}{(D_0^2 - y^2)(1 - y^2)} = 0 \quad (15)$$

解方程(15),并根据  $y < 1$  得到:

$$y_1 = 0,$$

$$y_{2,3}^2 = \frac{(1 + D_0^2) - \sqrt{(1 + D_0^2)^2 - 4(D_0^2 - 2p(1 + D_0))}}{2},$$

$$0 < p < \frac{D_0^2}{2(1 + D_0)}$$

即有:

$$y_{2,3}^2 = \frac{(1 + D_0^2) - \sqrt{(1 - D_0^2)^2 + 8p(1 + D_0)}}{2},$$

$$0 < p < \frac{D_0^2}{2(1 + D_0)}$$

得到解为:  $y_1$  是稳定解,  $y_{2,3}$  是不稳定平衡解. 当有脉

冲幅值为  $ma$  的脉冲信号作用在传感器上时,根据能量守恒原则,在前叙的假设下计算临界脉冲时间:

$$\frac{1}{2} ma^2 (\dot{t})^2 = \frac{1}{2} kd_0^2 \times \left( y_2^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \ln \frac{D_0^2(1 - y_2^2)}{D_0^2 - y_2^2} \right) \quad (16)$$

或

$$a(\dot{t}) = d_0 \sqrt{y_2^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \ln \frac{D_0^2(1 - y_2^2)}{D_0^2 - y_2^2}} \quad (17)$$

$$t_c = \frac{0 d_0}{a} f_2(p) \quad (18)$$

$$f_2(p) = \sqrt{y_2^2 - 2p \frac{1}{1 - D_0} \ln \frac{D_0^2(1 - y_2^2)}{D_0^2 - y_2^2}} \quad (19)$$

图 6 所示为其变化曲线.

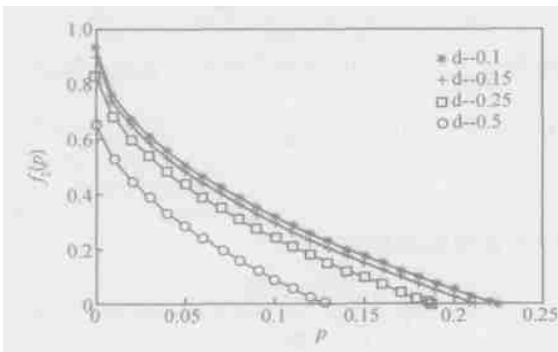


图 6  $f_2(p)$  在不同的倾斜角时随  $p$  的变化

Fig. 6 Dependence of  $f_2(p)$  on  $p$  for double-sided capacitive structure for different angle of decline

### 4 力反馈式电容驱动

如图 7 所示,在力反馈式传感器的固定电极上分别加测试信号  $(V_0 + V_1 \sin t)$ ,  $(-V_0 - V_1 \sin t)$ ,在可动电极上反馈电压  $V_r$ .当振子相对于平衡位置有微小位移  $y$  时,系统的势能为:

$$E(y) = \frac{1}{2} ky^2 - \frac{1}{2} ((C_1(y) V_1^2 - C_0 V^2) + (C_2(y) V_2^2 - C_0 V^2)) \quad (20)$$

式中

$$V = V_0 + V_1 \sin t$$

$$C_0 = \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \ln \left\{ \frac{d_0}{d_0 - 2h \tan \alpha} \right\}$$

$$= \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \ln \left\{ 1 + \frac{2h}{d_0 - 2h} \right\}$$

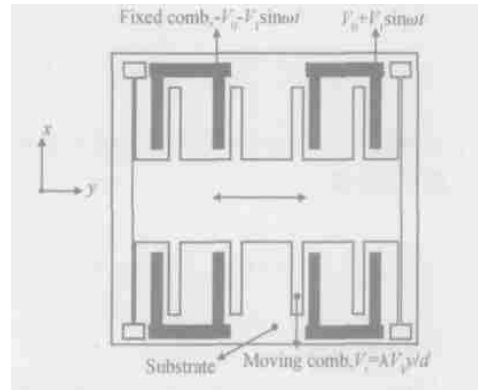


图 7 电容式传感器带力反馈的双边驱动

Fig. 7 Schematic structure of a forced-balanced capacitive comb sensor

对于较小的  $2h$ , 电容用下面近似:

$$C_0 = \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \times \frac{2h}{d_0 - 2h}$$

$$C_1 = \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \times \frac{2h}{d_0 - y - 2h}$$

$$C_2 = \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \times \frac{2h}{d_0 + y - 2h}$$

$$E(y) = \frac{1}{2} ky^2 - \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \left\{ \frac{2h}{d_0 - 2h - y} V_1^2 + \frac{2h}{d_0 - 2h + y} V_2^2 - 2 \frac{2h}{d_0 - 2h} V^2 \right\} \quad (21)$$

如果驱动信号的频率比机械结构的共振频率高很多<sup>[3]</sup>,上式可变化为:

$$E(y) = \frac{1}{2} kd_0^2 y^2 - \frac{1}{2} \times \frac{0L}{2} \times \left( \frac{1 - D_0}{D_0 - y} \left( (V_0 - V_r)^2 + \frac{1}{2} V_1^2 \right) + \frac{1 - D_0}{D_0 + y} \left( (V_0 + V_r)^2 + \frac{1}{2} V_1^2 \right) - 2 \frac{1 - D_0}{D_0} \left( V_0^2 + \frac{1}{2} V_1^2 \right) \right) \quad (22)$$

当  $y < y_s = 1/\lambda$ , 其中  $\lambda = V_1/V_0$ ,  $V_r = V_1 y$  得到下式:

$$E(y) = \frac{1}{2} kd_0^2 \left\{ y^2 - 2p \left[ \frac{2}{(D_0^2 - y^2) D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \lambda^2 \right) y^2 - \frac{1}{(D_0^2 - y^2)} 4 \left( \frac{y}{D_0} \right)^2 + \frac{2D_0}{(D_0^2 - y^2)} \left( \frac{y}{D_0} \right)^2 y^2 \right] \right\} \quad (23)$$

$$E(y) = \frac{1}{2} kd_0^2 \left\{ y^2 - 2p \left[ \frac{2}{D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \lambda^2 \right) + \dots \right] \right\}$$

$$2D_0 \left( \frac{y}{D_0} \right)^2 - 4 \left( \frac{y}{D_0} \right) \left. \frac{y^2}{(D_0^2 - y^2)} \right\} \quad (24)$$

根据极值条件得到如下方程：

$$\left\{ y \left[ 1 - 4p \left[ \frac{1}{D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \right)^2 \right] + \right. \right. \\ \left. \left. D_0 \left( \frac{y}{D_0} \right)^2 - 2 \left( \frac{y}{D_0} \right) \right] \frac{D_0^2}{(D_0^2 - y^2)^2} \right\} = 0 \quad (25)$$

根据  $y$  的物理意义，解该方程得到

$$y_0 = 0, \\ y_{1,2} = \pm \sqrt{D_0^2 - 4p \left[ \frac{1}{D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \right)^2 \right] + D_0 \left( \frac{y}{D_0} \right)^2 - 2 \left( \frac{y}{D_0} \right)} D_0^2$$

式中  $y_0$  为稳定平衡解； $y_{1,2}$  为两个不稳定平衡解。 $y_0$  对应能量的最小值， $y_1, y_2$  对应能量的最大值，当  $y_2 < y_s$  时：

$$E = E(y_2) - E(y_0) \\ = \frac{1}{2} k d_0^2 \left\{ y_2^2 - 2p \left[ \frac{2}{D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \right)^2 \right] + \right. \\ \left. 2D_0 \left( \frac{y_2}{D_0} \right)^2 - 4 \left( \frac{y_2}{D_0} \right) \frac{y_2^2}{(D_0^2 - y_2^2)} \right\} \quad (26) \\ t_c = \frac{d_0}{a} f_3(p)$$

$$f_3(p, \dots) = \sqrt{y_2^2 - 2p \left[ \frac{2}{D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \right)^2 \right] + 2D_0 \left( \frac{y_2}{D_0} \right)^2 - 4 \left( \frac{y_2}{D_0} \right) \frac{y_2^2}{(D_0^2 - y_2^2)}} \quad (27)$$

当  $y > y_s$  时， $V_r$  用  $V_0$  取代即可，得到此时的能量方程为：

$$E(y) = \frac{1}{2} k d_0^2 \times \left\{ y^2 - 2p \left[ \frac{2}{D_0} \left( 1 + \frac{1}{2} \right)^2 \right] + 2D_0 - 4 \frac{y^2}{D_0^2 - y^2} \right\}$$

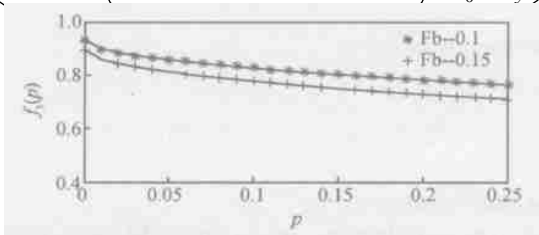


图 8  $f_3(p)$  在不同的倾斜角时随  $p$  的变化

Fig. 8 Dependence of  $f_3(p)$  on  $p$  for a forced and balanced capacitive structure for different angle of decline

此时  $E(y)$  的最大值也可用数字方法解得。图 8 所示为其变化曲线。

## 5 分析及讨论

当梳齿电容传感器单边驱动时，由图 4 可知，当  $p$  值增大，即电压驱动信号增大时，电容式传感器的抗冲击性能降低，当板的倾斜角分别为  $0.1^\circ, 0.15^\circ, 0.25^\circ, 0.5^\circ$  时， $p$  对应的最大值分别为 0.135, 0.125, 0.11, 0.075，即随着电容极板间的倾斜角增加， $p$  的最大值减小。当  $p = 0.05$  时，各个倾斜角对应的  $f_1(p)$  的值分别为 0.4665, 0.44, 0.3826, 0.2112，即随着倾斜角的增加，传感器能够承受冲击的最大时间变小，倾斜角由  $0.1^\circ$  变到  $0.5^\circ$ ，其可靠工作范围变为原来的 0.45。

当梳齿电容传感器双边驱动时，由图 6 可知，当  $p$  值增大时，即电压驱动信号增大时，电容式传感器的抗冲击性能降低，当板的倾斜角分别为  $0.1^\circ, 0.15^\circ, 0.25^\circ, 0.5^\circ$  时， $p$  对应的最大值分别为 0.224, 0.211, 0.186, 0.128，分别为单边电容结构的 1.66, 1.699, 1.69, 1.71 倍，说明梳齿电容极板的倾斜效应对双边的影响要小于对单边的影响。随着倾斜角度的增加， $p$  的最大值减小。当  $p = 0.05$  时，对应的  $f_2(p)$  值分别为 0.5077, 0.4836, 0.4320, 0.2855，即在双边电容驱动情况下，随着倾斜角的增加，传感器能够承受冲击的最大时间变小。当倾斜角由  $0.1^\circ$  变到  $0.5^\circ$  时，其可靠工作范围减小到原来的 0.56。从上面的分析也可看出，电容极板的不平行效应对双边电容结构的影响小于对单边电容结构影响。如在  $p = 0.05$ ，倾斜角同为  $0.5^\circ$  时，双边驱动的可可靠工作范围为单边驱动的 1.35 倍。

当为带力平衡的双边电容驱动时，由图 8 可知，当  $p$  值增大，即电压驱动信号增大时，电容式传感器的抗冲击性能降低。当板的倾斜角分别为  $0.1^\circ, 0.15^\circ, p = 0.05$  时，对应的  $f_3(p)$  的值分别为 0.8569, 0.8121，即随着倾斜角的增加，当倾斜角由  $0.1^\circ$  变到  $0.15^\circ$  时，其可靠工作范围减小到原来的 0.95，即电容极板的不平行效应对力平衡式传感器的影响更小。通过比较，在同样的倾斜角下，力平衡式传感器的抗冲击性能也优于单边驱动和双边驱动的情形。

文中的电容计算模型假定梳齿的倾斜角度较小，且忽略了边缘效应。我们用有限元软件 ANSYS

5.7 中的 Trefftz 电容计算方法对考虑边缘效应的电容进行了计算. 对于梳齿厚度为  $80\mu\text{m}$ , 长度为  $100\mu\text{m}$ , 极板的间距为  $4\mu\text{m}$  的梳齿, 当梳齿的倾斜角分别为  $0.1, 0.15, 0.25, 0.5$  时, 电容的有限元模拟值和理论计算值的误差分别为:  $10\%, 10.6\%, 10.9\%, 11.1\%$ . 由于传感器的电容只能通过数字方法才能得到精确值, 所以文中用能量法对传感器可靠工作范围分析时, 忽略了边缘效应的影响.

## 6 结论

由上面分析可知, 在同样的倾斜角下, 就抗冲击能力来说, 力平衡结构优于双边电容结构和单边电容结构. 当  $p = 0.05$ , 倾斜角由  $0.1$  变到  $0.5$  时, 单边电容结构和双边电容结构的可靠工作范围分别变为原来的  $0.45$  和  $0.56$ . 对于力平衡结构, 当  $p = 0.25$ , 倾斜角由  $0.1$  变到  $0.15$  时, 可靠工作范围减小到原来的  $0.925$ .

分析结果表明, 在设计这些类型的电容传感器的可靠工作范围时, 电容极板的不平行效应是不容忽视的. 在制作传感器梳齿时, 可以用如下方法减小因 DRIE 工艺引起的梳齿不平行: (1) 在衬底上狭槽

底部处溅射铝, 并使铝层和硅振子相连<sup>[4]</sup>. 当最后一层硅膜刻蚀掉后, 粒子轰击铝层, 由于铝层和硅衬底电学连接, 电荷会释放到硅衬底中, 从而使其对粒子产生的静电弯曲力消失; (2) 增加侧壁保护层的淀积时间, 使侧壁得到完全保护; (3) 由于侧壁的钝化层在低温时不易被破坏<sup>[5]</sup>, 降低刻蚀环境的温度也可以使侧蚀效应降低.

## 参考文献

- [ 1 ] Bao Minhang, Sun Yuancheng, Huang Yiping, et al. Reliable operation condition of capacitive inertial sensor for step and shock signals. STC03, 2003:112
- [ 2 ] Tay F E H, Xu Jun, Liang Y C, et al. The effects of non-parallel plates in a differential capacitive microaccelerometer. Journal of Micromechanical and Microengineering, 1999, 9:283
- [ 3 ] Bao Minhang. Handbook of sensors and actuators series: Micro Mechanical Transducer. First ed. Elsevier, 2000:123
- [ 4 ] Chablotz M, Jiao J W, Yoshida Y, et al. A method to evade microloading effect in deep reactive ion etching for anodically bonded glass-silicon structures. Proc IEEE Micro ElectroMechanical System Workshop (MEMS '00), Miyazaki, Japan, 2000
- [ 5 ] Dussart R, Boufnichel M, Marcosl G, et al. Passivation mechanisms in cryogenic  $\text{SF}_6/\text{O}_2$  etching process. J Micromech Microeng, 2004, 14:190

## Effect of Non-Parallel Combs of Capacitive Micro-Sensor on Reliable Operation Range \*

Dong Linxi<sup>1,2</sup>, Che Lufeng<sup>2</sup>, and Wang Yuelin<sup>1,2</sup>

(1 Department of Information Science & Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

**Abstract:** The effect of non-parallel combs on the reliable operation range in three capacitive accelerometer configurations is investigated. It is found that at the same drive voltage, the reliable operation ranges of the single capacitor and double-sided capacitor are diminished to  $0.45$  and  $0.56$  respectively when the angle of decline is changed from  $0.1^\circ$  to  $0.5^\circ$ , the reliable range of force-balanced configuration is diminished to  $0.925$  when the angle of decline is changed from  $0.1^\circ$  to  $0.15^\circ$ . The method to diminish the effect is also investigated.

**Key words:** capacitive sensor; inertial sensor; reliable operation condition; pulse signal

**EEACC:** 2575; 7230

**Article ID:** 0253-4177(2005)02-0373-06

\* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G1999033101)

Dong Linxi male, was born in 1976, PhD candidate. His research interests are in micromechanical inert sensors and their fabrication technologies.

Che Lufeng male, was born in 1970, PhD, associate professor. He is engaged in research on micromechanical inert sensors and their system integration.

Received 13 February 2004, revised manuscript received 8 May 2004