

## Capacitance Analyses on Electromechanical Interface Model of Horizontal-Axis Silicon Micromachined Gyroscope \*

YE Fu, WANG Shou-rong \*, CHENG Long

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The electromechanical interface model of the structure of the horizontal-axis silicon micromachined gyroscope is established. The impacts of the stray capacitance on output signal are analyzed and simulated with the simulation software of circuit. The results indicate that the capacitances between mass and the substrate, disposal wires have made great impact on output signal. At last, some methods are put forward to decrease the stray capacitance and increase the signal noise ratio.

**Key words:** silicon micromachined gyroscopes; electromechanical interface model; stray capacitance; simulation.

EEACC:7630;2575

## 水平轴硅微机械陀螺仪机电接口模型的电容分析 \*

叶 甫,王寿荣\*,程 龙

(东南大学仪器科学与工程学院,南京 210096)

**摘 要:** 以水平轴硅微机械陀螺仪结构为对象,建立了陀螺仪机电接口的理论模型,分析了模型中杂散电容对输出信号的影响,并用电路分析软件对模型进行仿真。结果表明,陀螺仪活动结构与衬底、引线间的电容对输出信号的影响很大,最后提出了减小杂散电容,提高信噪比的方法。

**关键词:** 硅微机械陀螺仪;机电接口模型;杂散电容;仿真

中图分类号:V241.554

文献标识码:A

文章编号:1004-1699(2008)03-0480-03

硅微机械陀螺仪,是通过检测敏感电容的变化量来测量输入角速率的。在结构中,除了存在有用电容如驱动电容、敏感电容外,还存在许多杂散电容。由于硅微机械陀螺仪的尺寸微小,尽管施加的电信号相对比较微弱,但产生的杂散电容值往往大于或远大于敏感电容的变化量,它们对检测结果有着很大的影响,为提取有用信号带来了一定的难度。因此,分析机电接口中的杂散电容具有重大意义。

下面以水平轴硅微机械陀螺仪为例,建立机电接口模型,分析其机械结构与电路接口中的电容、电阻。

### 1 建立水平轴硅微机械陀螺仪模型

如图 1 所示 y 轴硅微机械陀螺仪采用梳齿电容驱动、平板电容检测的方式,通过检测敏感电容的变

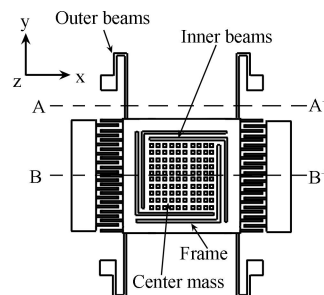


图 1 y 轴硅微机械陀螺结构

化量以测得输入角速率。陀螺仪工作时,在固定梳齿上施加带有直流偏置,相位相差 180 的交流电压  $V_d = V_{dc} \pm V_{ac} \cos(\omega t)$ ,当壳体绕 y 轴以角速度  $\omega$  相对惯性空间转动时,检测质量沿 z 轴方向振动,且振幅与输入角速度成正比。采用对称的双质量结构形式,

在检测电极上施加载波  $\pm V_i$ , 通过测量检测质量与金属极板之间的敏感电容的变化, 可求出角速率。

硅微机械陀螺仪的结构采用经过浓硼扩散的硅作为材料, 它是良导体。所以可将陀螺仪的内外框架视为电路中的一个节点, 陀螺仪就是一个 RC 电路, 在这个 RC 电路中除了有用电容外还有杂散电容和电阻。

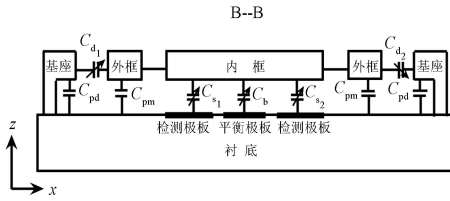


图 2 y 轴硅微机械陀螺仪 B - B 处的截面图

如图 2 所示  $C_{d1}$ 、 $C_{d2}$  分别为驱动电容,  $C_{s1}$ 、 $C_{s2}$  为敏感电容,  $C_b$  为平衡极板和活动结构之间的电容,  $C_{pd}$  为驱动电极与衬底间的电容,  $C_{pm}$  为质量块与衬底间的电容。驱动电压、载波的输入和陀螺仪信号的输出通过衬底上的金属导线。

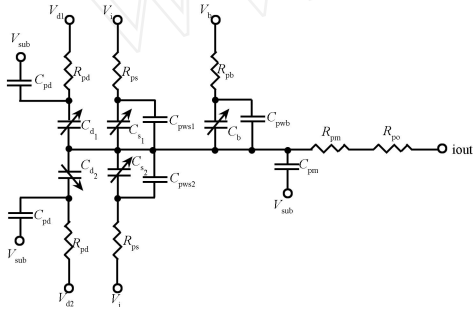


图 3 y 轴硅微机械陀螺接口电路

根据图 2 的电容分布情况建立 y 轴硅微机械陀螺仪的机电接口模型, 如图 3 所示,  $C_{pws}$ 、 $C_{pwb}$  分别为检测极板和平衡极板的引线与活动结构间的电容,  $R_{pd}$  为驱动电极到驱动电路端口间导线的电阻。  $R_{ps}$  为敏感电极到检测电路端口间导线的电阻。  $R_{pb}$  为平衡电极到检测电路端口间导线的电阻。  $R_{pm}$  为陀螺仪活动结构的电阻。  $R_{po}$  为陀螺仪结构的输出端到检测电路端口间导线的电阻。

## 2 机电接口模型的电容分析

采用开环检测, 平衡极板上不加电压。由于金属导线的电阻很小, 忽略其对输出电压的影响, 输出电压为:

$$V_{out} = \frac{2I(C_d V_{ac} + C_{d0} V_{dc}) + (C_s + C_{pws}) V_i}{2(C_{d0} + C_{s0} + C_{pws}) + C_{pm}} \quad (1)$$

由于驱动电压频率远低于载波电压的频率, 通过电路技术滤掉与驱动电压同频的输出电压以及直流电压, 此时输出信号为:

$$V_{out2} = \frac{2(C_s + C_{pws}) V_i}{2(C_{d0} + C_{s0} + C_{pws}) + C_{pm}} \quad (2)$$

设驱动位移为  $x$ , 敏感位移为  $z$ 。敏感电极与活动结构间距为  $z_0$ , 则

$$C_{s0} = \frac{1}{2} (C_1 - C_2) = \frac{1}{2} \left( \frac{A}{Z_0 - Z} - \frac{A}{Z_0 + Z} \right) = \frac{AZ}{Z_0^2 - Z^2} \quad (3)$$

$$C_s = C_{s0} \pm C_{s0} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = C_{s0} \pm C_s \quad (4)$$

由于采用双质量块结构形式, 构成差动检测电容, 两个陀螺的输出有用信号为:

$$V_s = \frac{4 C_s V_i}{2(C_{d0} + C_{s0} + C_{pws}) + C_{pm}} \quad (5)$$

有用信号  $V_s$  与  $C_{d0}$ 、 $C_{s0}$ 、 $C_{pws}$ 、 $C_{pm}$  成反比, 与  $C_s$  成正比, 所以要增大有用信号, 可以增大  $C_s$ , 减小  $C_{d0}$ 、 $C_{s0}$ 、 $C_{pws}$ 、 $C_{pm}$ 。而  $C_s$ 、 $C_{s0}$ 、 $C_{pws}$ 、 $C_{pm}$  都与陀螺活动结构与衬底的间距  $Z_0$  有关。因此可以保持  $Z_0$  不变, 在满足陀螺驱动力  $F_d = 2V_{dc} V_{ac} C_{d0} / l$  不变的前提下, 可以减小驱动梳齿重叠长度  $l$ , 达到减小  $C_{d0}$  增大输出的有用信号的目的。

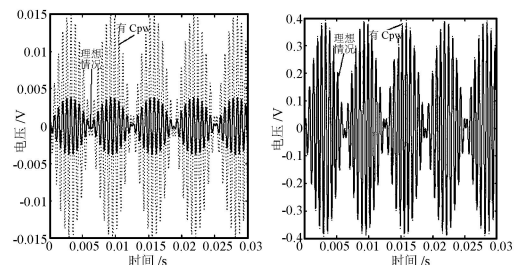
## 3 仿真

以一个具体的 y 轴硅微机械陀螺结构为例对模型进行仿真, 分析  $C_{pws}$ 、 $C_{pm}$  对输出电压的影响程度。

### 3.1 $C_{pws}$ 变化对输出信号的影响

从图 3 中可以看出  $C_{pws}$  和  $C_{pwb}$  并联, 若陀螺仪工作时  $C_{pws}$  发生变化, 变化量为  $\Delta C_{pws}$  则它会产生与有用信号同频的干扰信号, 很难通过电路技术将其分辨出来, 因而要尽量避免电容  $C_{pws}$  的变化, 确保该电容不产生干扰信号。现对具体模型进行仿真, 分析  $C_{pws}$  变化时对输出信号的影响。仿真分成两种情况, 一种是理想情况, 即只有敏感电容  $C_s$  时, 在不同角速率下的输出; 另一种是  $C_{pws}$  变化时, 在不同角速率下的输出。该陀螺仪的  $C_s = 0.4387122 \times 10^{-14} \cdot (F)$ ,  $C_{pws} = 0.110625 \times 10^{-14} (F)$ 。仿真数据如表 1 所示。

图 4(a) 为输入角速率  $\omega = 5 (9/s)$  时输出波形, 图 4(b) 为输入角速率  $\omega = 500 (9/s)$  时输出波形。



(a)  $\omega = 5 (9/s)$  (b)  $\omega = 500 (9/s)$

图 4 理想情况和有  $C_{pws}$  时输出电压

表1 理想情况和有  $C_{pws}$  时输出电压

$z$ ( $^{\circ}/s$ )	0	1	5	50	500
理想情况/mV	0	0.4975	2.488	24.88	248.8
有 $C_{pws}$ /mV	7.192	7.69	9.68	32.07	256

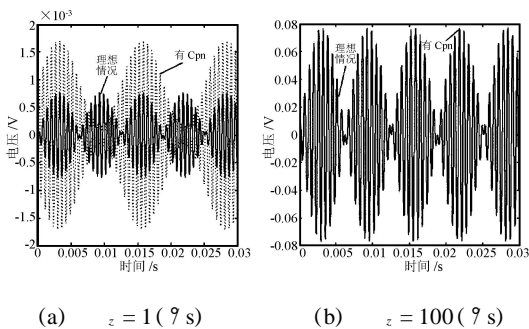
仿真结果表明由于  $C_{pws}$  的影响,在没有输入角速率的情况下就会有很大的输出值,当输入角速率较小时输出值远大于理想状态时的输出,当输入角速率比较大时输出值越接近理想状态时的输出。可见  $C_{pws}$  对输出影响很大,由于它具有与有用信号相同的频率,电路上很难将其分辨,所以在结构设计时尽量减少该电容值。为了减小  $C_{pws}$ ,在布线时尽量让引线与活动结构不重叠,即使有了重叠,应使陀螺仪在运动时它们的重叠面积没有变化,即保持  $C_{pws}$  不变。

### 3.2 $C_{pm}$ 对输出信号的影响

假设衬底上的极化电压为  $5\text{ mV}$ ,  $C_{pm} = 0.187951 \times 10^{-13} (F)$ ,仿真同样分两种情况,仿真数据如表2所示。图5(a)为输入角速率  $z = 1(^{\circ}/s)$  时输出波形,图5(b)为输入角速率  $z = 100(^{\circ}/s)$  时输出波形。

表2 理想情况和有  $C_{pm}$  时的输出电压

$z$ ( $^{\circ}/s$ )	0	0.1	1	10	100
理想情况/mV	0	0.04975	0.4975	4.975	49.75
有 $C_{pm}$ /mV	0.939	0.9893	1.437	5.915	50.69

图5 理想情况和有  $C_{pm}$  时的输出电压

仿真结果表明,由于  $C_{pm}$  的影响,在没有输入角速率的情况下,有很大的输出值。当输入角速率较小时,输出值远大于理想状态时的输出。当输入角速率比较大时,输出值越接近理想状态时的输出,且相位与理想状态时的相位比较接近。要削弱该信号对输出的影响,一是减小  $C_{pm}$ ,二是要消除衬底上的电压。考虑到敏感电容的关系,不能通过减小质量块体积和减小活动质量与衬底间距来减小  $C_{pm}$ ,只有通过消除衬底电压来减小  $C_{pm}$  对输出的影响。

## 4 结论

陀螺仪活动结构与引线间电容  $C_{pws}$  以及与衬底间电容  $C_{pm}$ ,对陀螺的输出信号影响很大,因此在引线布置时必须使得陀螺仪在运动时,引线与活动结构的重叠面积没有变化,同时消除衬底上的极化电压,尽量减小它们对输出信号的影响,提高信噪比。

本文是基于陀螺结构建立的理论模型,而在实际情况下,杂散电容、电阻要复杂的多,要充分考虑加工误差和经过大量的实验,才能建立更精确的模型。

### 参考文献:

- [1] Yoichi Mochida, Masaya Tamura and Kuniki Ohwada. A Micromachined Vibrating Rate Gyroscope Eams for the Drive and Detection Modes. 618-623.
- [2] Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined Inertial Sensors [C]. Proc. IEEE, Aug. 1998, 86(8): 1640-1659.
- [3] 施芹,王寿荣,杨波, Z 轴硅微机械陀螺仪的机电接口模型分析, [J]中国惯性技术学报, 2005, 12, 13(6): 90-94.
- [4] Jiang Xuesong. Capacitive Position-Sensing Interface for Micromachined Inertial Sensors [D]. Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California, Berkeley, 2003.
- [5] 施芹. 提高硅微陀螺仪性能若干关键技术研究-正交误差与杂散电容分析研究 [D] 东南大学博士论文 2006.



叶 甫(1983-),男,硕士研究生,研究方向为微惯性传感器理论与结构设计, solar\_corona@msn.com



王寿荣(1946-),男,教授,博士生导师,东南大学仪器科学与工程学院测控技术与机电工程教研室主任,从事微惯性技术与测控技术方面的研究, srwang@seu.edu.cn