

静电驱动微机械梳状陀螺仪中典型结构的可靠性研究

刘凤丽^{1,2}, 郝永平², 高连兴¹

(1. 沈阳农业大学工程学院, 辽宁 沈阳 110161; 2. 沈阳理工大学 CAD/CAM 中心, 辽宁 沈阳 110161)

摘要:以经过结构参数优化后的微机械陀螺仪为研究对象, 针对其梳齿驱动器、悬臂梁和平行板电容器这三种典型结构, 分析了影响其结构可靠性的因素, 验证了梳齿驱动器结构参数满足了稳定性要求; 得到了感测平行板电容器的临界电压, 讨论了平行板的弯曲变形的影响; 为保证悬臂梁的可靠性, 限定了陀螺仪的工作量程。

关键词:可靠性; 微机械陀螺仪; 典型结构; MEMS

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1194(2007)01-0072-04

The Reliability Research of Typical Structures of Electrostatic drive Comb Gyroscope

LIU Feng-li^{1,2}, GAO Lian-xing¹, HAO Yong-ping,²

(1. Engineering Institute, Shenyang Agriculture University, Shenyang 1101618, China;

2. R & D Center of CAD/CAM technology, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: This paper analyzes the reliability for gyroscope and its structure parameters has been optimized. The reliability effecton factors of typical structures are researched, such as comb diver, parallel plate capacitor and cantilever. The structure parameters of comb diver meet the stability requirement. The pull-in voltage is get and the curvature affection of parallel plate on capacitor is researched. The range of the measure scale is limited to ensure the reliability of cantilever.

Key words: reliability; micro-mechanical gyroscope; typical structures; MEMS

0 引言

微电子机械系统 (Micro Electro Mechanical Systems 简称 MEMS) 是近年来发展迅速的一种高新科学技术, 集成微电子和微机械、具有微观尺寸的静止或移动部件的装置或系统, 具有感测、控制和驱动的功能^[1]。MEMS 惯性仪表中的微机械陀螺仪得到了很大的发展, 出现了音叉式、线振动式、角振动式等多种结构。由于具有体积小、质量轻、功耗低、可批量生产和测量范围大等优点, 微陀螺在高精度炮弹、炮弹的惯性导航系统、小型卫星和航天器、汽车防滑刹车系统、安全气囊展开和自动调整系统等军事和民用方面得到广泛的应用。

从目前来看, MEMS 加工中的在线测试、产品封装和可靠性分析成为 MEMS 发展的主要瓶颈问题。由于 MEMS 涉及机械、电子、光学等交叉领域, 可靠性的分析较为复杂, 若是通过制造出产品的样品来进行验证, 这种方法延长了设计周期, 增加了设计费用, 不利于其产业化发展。国外对 MEMS 器件的可靠性研究正处在发展阶段, 由于 MEMS 的很多加工方法借鉴于 IC 技术, 因此几乎所有的 IC 失效分析手段都可以应用在 MEMS 中, 结合 MEMS 生产中本身的独特之处, 借助电子的失效分析测试仪器如: 光学显微镜、扫描电子显微镜、扫描激光显微镜、原子力显微镜、聚焦离子束、红外显微镜等对 MEMS 器件在工作失效形式上进行观察、分析找到

* 收稿日期: 2006-09-25

作者简介: 刘凤丽 (1975-), 女, 辽宁朝阳人, 讲师, 硕士, 研究方向: MEMS 可靠性研究与结构设计。

MEMS 器件失效的一些主要形式(如对具有相对转动部件来说磨损、粘附为其主要原因,而对于高速旋转部件还要考虑其强度问题),因此对生产提出了一些提高可靠性的解决方法(如对表面的化学处理)。但是在失效模型上提出的并不多,现有的如:粘附失效模型,它能够描述出失效的物理机理并能在最终的设计中预测其使用寿命。

目前对微机械陀螺仪的研究已从基础研究阶段发展到开发实用商业产品阶段,相应的可靠性分析还没有同步发展,所以仅有少数该类产品走向市场,不能形成规模。由于微机械陀螺仪在许多应用领域里的失效都会带来巨大损失,而国内对该方面的研究又起步晚,很少见到相关报道,因此进行可靠性研究显得十分迫切。鉴于微机械陀螺仪主要以典型零件构成,所以对微机械陀螺仪的可靠性研究可以通过借助 IC 技术和耦合分析技术对典型结构的可靠性分析来完成。

1 微机械陀螺仪结构

微机械陀螺仪谐振器的实体模型如图 1 所示^[2]。

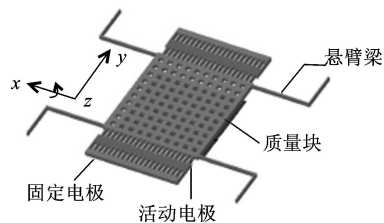


图 1 微机械陀螺仪谐振器的 3D 模型

它包括四个水平梁、四个垂直梁、一块矩形电极、一个多晶硅平板 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ (即惯性质量块,为减少阻力,在平板上开了一定的阻尼孔 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$) 和两对直齿梳 $80\ \mu\text{m} \times 6\ \mu\text{m}$ 组成,此外还有电源、接地点、固定锚点等。带有梳状电极的平板与八个挠性梁(即相当于弹簧)相连,而挠性梁连接到其固定端(锚点)上,并被支撑在基底上方,构成活动部分。固定锚点和固定梳齿被固定在基底上。两个固定梳齿的梳齿部分是悬空的,其余部分固联在基底上,一对活动梳齿整个悬空,通过挠性梁与四个锚点相固联。在本次分析中,微陀螺的结构参数经过系统级的优化分析后,得到的优化结果如下:垂直梁长度、宽度为 $175\ \mu\text{m}$ 、 $6\ \mu\text{m}$;水平梁长度、宽度为 $430\ \mu\text{m}$ 、 $7\ \mu\text{m}$ 。

2 微机械陀螺仪典型结构的可靠性分析

尽管微机械陀螺仪在一些领域的应用已经存在了数年,当对其在设计、生产和封装、使用等领域的失效分析却比其设计、加工要晚很多。这是由于相对宏观件来说,除了具有与宏观领域中常见的断裂、疲劳、磨损等失效形式外, MEMS 中失效的形式与宏观件有所不同,如在微观尺度范围内,表面间的分子作用力要比宏观显著增强,而且不能使用宏观领域内常用的润滑产品,因此粘附问题成为 MEMS 中重点考虑的一种失效的形式^[3]。

MEMS 的可靠性可分为系统级、部件级、应用级和材料级的可靠性,以下将在部件级对微机械陀螺仪中的梳电容式驱动器、感测平行板电容器和悬臂梁三种典型结构的可靠性进行分析。

2.1 梳电容式驱动器的可靠性分析

从微机械陀螺仪的结构可看出,硅微型梳齿驱动陀螺仪有两部分形成电容。第一部分是活动梳齿与固定梳齿的梳齿部分交错对插形成的梳电容。该梳电容形成驱动回路,起驱动惯性质量块的作用,其结构单元如图 2 所示。

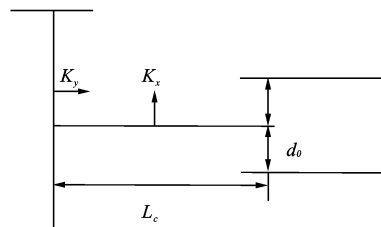


图 2 梳齿结构单元简图

对于梳电容来说,它将驱动质量块沿 y 方向振动,它的可靠性将直接影响微机械陀螺仪的性能,为讨论方便,假设在活动梳齿上集聚的是负电荷,那么在其两侧的固定梳齿上集聚的应该是等量正电荷。只有活动梳齿两侧的间距相等时才能保证梳齿的平衡,因此活动梳齿受到任何的扰动都会出现结构的非对称情况导致失去平衡,在静电引力作用下进而导致其偏向某一侧的固定梳齿,并有可能发生粘附,容易引起搭接短路和击穿放电,造成器件失效。从机械的角度来说,梳齿驱动本身是一个非稳定系统,因此在最初的设计中就要考虑到要保证梳齿在刚开始振动的时候不会发生此类的失效。所以

在静电梳齿驱动器设计中,忽略电磁力等的影响,可靠性主要满足机械稳定性的要求。

由于系统的稳定与能量有关,那么保证稳定就需要保证在 x 方向存储的能量要远大于 y 方向的能量,因此要满足以下方程式:

$$\frac{1}{K_y} d_0^2 \gg N \frac{L_c^2}{K_x} \quad (1)$$

式中:
$$K_x = \frac{3EI_v}{L_v^3} \quad (2)$$

$$K_y = \frac{12EI_p I_v}{L_p^3 I_v + 3L_p^2 L_v I_p} \quad (3)$$

$$I_v = \frac{b_v h^3}{12} \quad (4)$$

$$I_p = \frac{b_p h^3}{12} \quad (5)$$

式中: K_x 、 K_y 为活动梳齿的支撑系统沿 x 、 y 方向等效刚度系数; L_c 为梳齿长度; d_0 为固定梳齿与活动梳齿之间的间距; N 为安全系数; L_p 为水平悬臂梁的长度; L_v 为垂直梁长度; E 为弹性模量; h 为悬臂梁厚度; I_p 为水平悬臂梁相对 y 轴的惯性矩; I_v 为垂直悬臂梁相对 x 轴的惯性矩; b_v 为垂直梁宽度; b_p 为水平梁宽度。

由式(1)可知,梳电容式驱动器受弹性梁结构(K_x 、 K_y)和梳齿结构(梳齿间隙 d_0)和梳齿最初交叠长度 L_c 限制。对于要有高可靠性要求的实际应用的场合,应有一个较大的安全系数 N 以保证梳齿不会因为发生表面接触而发生失效。将表1的结果代入以上公式,满足式(1)的要求。

梳电容式驱动器另外一个要考虑的可靠性问题是寄生电容对它的影响,如果梳齿结构是悬浮在另一个导体基底面之上,那么在二者之间必然存在着寄生电容,这种电容的存在会使驱动器产生扭转,甚至产生大的拉动将驱动器拉向基底,导致粘附和短路问题的出现。因此在设计中调整锚点的厚度使驱动器尽量远离导体基底,减小寄生电容而避免粘附的问题。

2.2 感测平行板电容器的可靠性分析

2.2.1 临界电压分析

硅微型梳齿振动陀螺仪的第二个电容是多晶硅平板和其下面的电极之间形成的平行板电容,它能够形成测量回路,起感应测量作用。微机械陀螺仪就是靠质量块与底部电极间的电容变化来输出测量结果,故此平行板电容器也是在设计过程中保证微机械陀螺仪可靠性的重要因素。尽管平行板电容器

具有很好的感测能力,但此类器件常见的一个问题就是极板间的非线性吸引力会随着距离的减小而呈二次方增长,那么就有可能克服悬臂梁(相当于弹簧)的拉力将质量块拉下来,与底部电极相接触,进而失效。故要对临界电压进行分析,在忽略外界冲击和载荷下,借助 CoventorWare 软件的直流转移系统级分析,将电极的电压从 0 V 以 0.1 V 为步长增加到 10 V,如图3所示,可以看出平行板的临界电压值在 5 V 左右。

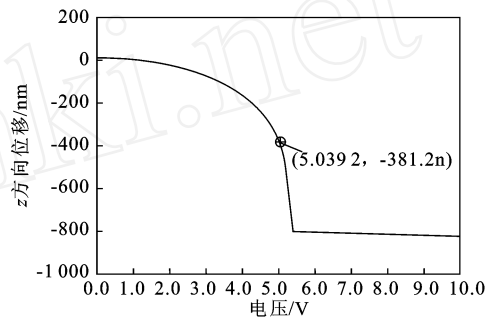


图3 临界电压分析结果

2.2.2 非平行电容的分析

由于多晶硅平板在加工过程中在移走牺牲层的时候,会使平板发生弯曲,此外在使用的过程中,由于悬臂梁的扭振也同样会使平板发生弯曲变形,这就会造成非平行板电容,对测量的结果造成误差,甚至造成与底部电极的接触进而失效。平板的弯曲变形函数可用(6)式表示:

$$z = f(x, y) = a_1(x - x_0)^2 + a_2(y - y_0)^2 + a_3(x - x_0)(y - y_0) + a_4(x - x_0) + a_5(y - y_0) \quad (6)$$

假设该平行板为对称变形,并且在平行板的中心位置变形量为最小,那么上式可以简化为:

$$z = f(x, y) = c(x - x_0)^2 + c(y - y_0)^2 \quad (7)$$

为了研究变量 c 对检测电容的影响,借助 CoventorWare 软件的直流工作点分析,将变量 c 从 0.5 以 0.5 为步长变化到 2,得到变量 c 对平行板弯曲变形和谐振频率的影响,如图4所示。

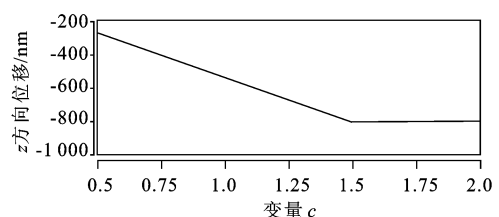
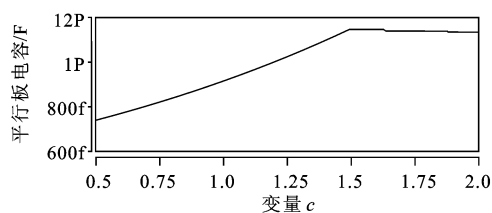


图4 变量 c 对平行板弯曲变形的影响

图5 变量 c 对平行板电容的影响

从图4可以看出当变量 c 值为1时,得到平行板中心沿 z 轴负方向位移为 551.1 nm 。在不考虑弯曲时由于梳齿的电场垂直对称分布,会对平行板生成向上的力,借助直流操作点分析得到平行板中心的平衡位置在 z 轴正向偏移 13.47 nm 。所以考虑弯曲变形后平行板中心比最初的平衡位置沿 z 轴低 564.57 nm 。这样由于平行板的弯曲就造成了电容减

少约 21% ,对器件的灵敏度产生一定的影响,而变量 c 对谐振频率的影响却很小。对工作在谐振频率下的陀螺仪来说,平行板弯曲变形的影响可以忽略。

2.3 悬臂梁的可靠性研究

悬臂梁是 MEMS 中常见的一类典型结构,在微机械陀螺仪中起弹簧的作用,这是因为在微米尺度下的多晶硅是极有弹性和坚韧的,不会发生断裂类失效^[3]。但在高 g 值测量过程中悬臂梁末端会发生较大的位移,并引起平行板电容器的极板发生接触,导致整个器件发生失效。将微机械陀螺仪的前四阶的模式运动形式放大 30 倍后,得到各阶模式形式如图 6 (a) ~ (d) 所示。第一阶模式是在 $x-y$ 平面内沿 y 轴方向的振动;第二阶模式形式是沿 z 轴方向的振动;第三阶模式为沿 y 轴方向的扭动;第四阶模式是在 $x-y$ 平面内的扭动。

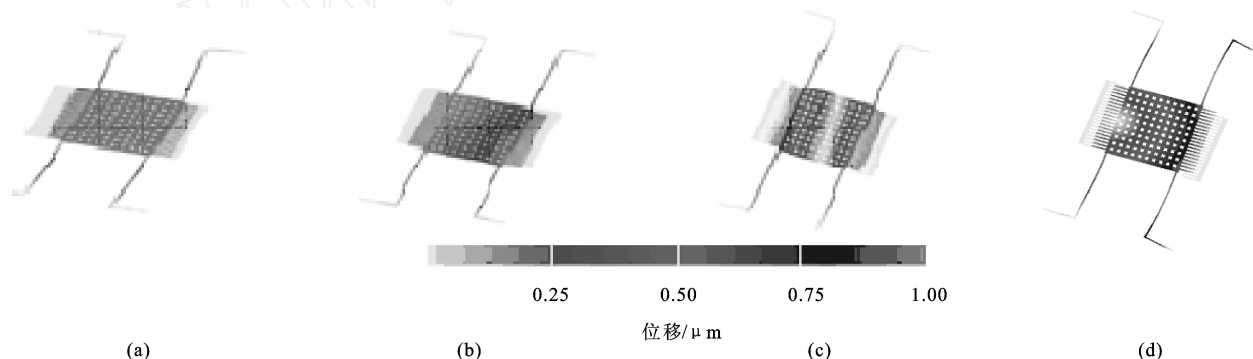


图6 陀螺仪前四阶模式图

通过运行 MemMech 求解器,可以得到质量块在加速度为 $4000 g$ 时沿各个方向的最大位移,如表 1 所示。

表1 质量块在 x, y, z 方向上的最大位移

方向	x	y	z
位移(μm)	0.14	1.00	9.52

那么在 $4000 g$ 的载荷下,平行板电容器的极板发生接触,故此陀螺仪的最大工作量程为 $4000 g$ 。

3 结论

本文基于微陀螺仪在 CoventorWare 系统级分析后得到的优化结构参数结果,对其中的梳齿式驱动器、感测平行板电容器、悬臂梁三种典型结构的可靠性进行了分析,验证了梳齿结构参数和悬臂梁的结构参数,满足了梳齿稳定性的要求,并求出了感测平行板电容器上所加偏置电压的临界值是 5 V ,

验证了平行板弯曲变形对谐振频率的影响较小,根据悬臂梁末端的最大位移求出陀螺仪的工作量程。证明优化的结果满足可靠性要求。由于 MEMS 大多由典型结构所组成,本文的可靠性分析方法可为其他具有这三类典型结构的 MEMS 器件的可靠性分析提供参考。

参考文献:

- [1] Coventor Inc. Architect Reference Guide and Tutorials [M]. Cary Nc:Coventor Inc,2003.
- [2]王寿容.硅微型惯性传感器理论及应用[M].南京:东南大学出版社,2000.
- [3]W merlijn van spengen. MEMS reliability from a Failure Mechanism perspective[J]. Microelectronics Reliability, 2003,(43): 1049-1060.
- [4]冯亚林. MEMS 可靠性技术[J]. 微纳电子技术,2002,(3):29-32.