

文章编号: 1672-2892(2011)02-0224-05

基于灵敏度分析的微机械陀螺稳健优化设计

周浩^{a,b}, 苏伟^a, 刘显学^a, 唐海林^a

(中国工程物理研究院 a.电子工程研究所; b.北京研究生部, 四川 绵阳 621900)

摘要: 提出了基于灵敏度分析的微机械陀螺稳健优化模型, 开发了相应的稳健设计流程。以往的研究是将设计变量中的不确定量考虑为统计容差, 与之不同的是, 该设计采用最坏情况容差分析, 优化算法使用遗传算法, 采用键合-离子反应深刻蚀加工器件。灵敏度分析结果表明稳健设计结果对误差是不敏感的。同时进行了蒙特卡洛分析, 结果表明有 88.35% 的样本是可接受的。

关键词: 微机械陀螺; 最优化; 稳健设计; 灵敏度分析

中图分类号: TN47; TP212.1

文献标识码: A

Robust design of microgyroscope based on sensitivity analysis and worst-case tolerance

ZHOU Hao^{a,b}, SU Wei^a, LIU Xian-xue^a, TANG Hai-lin^a

(a.Institute of Electronic Engineering, China Academy of Engineering Physics; b.Department of Graduate Student, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: This paper presents a robust optimal model of Micro Electro Mechanical Systems(MEMS) gyroscope and its design procedure. The proposed method adopts the sensitivity analysis considering the worst-case tolerance instead of statistical information about uncertainties. The genetic algorithm with the advantage of global optimization is employed. Sensitivity analysis shows the robust design is less sensitive to errors. Monte Carlo analysis is also performed, whose result indicates 88.35% of samples are acceptable. The gyroscope is fabricated using bonding and deep etching bulk micromachining process.

Key words: microgyroscope; optimization; robust design; sensitivity analysis

在微机械电子系统(MEMS)器件的研制和开发中考虑稳健设计非常重要, 因为加工误差对微器件的影响比对宏观机械系统要大得多^[1]。这导致了器件的实际性能与理论设计存在差异, 这些差异可能会降低器件性能甚至造成失效。关于微器件的稳健设计已有大量的研究^[1-4]。Wu D H 等人利用有限元方法和传统稳健设计方法(田口法)研究了石英晶体微天平^[2]。田口法通常仅适用于无约束的单目标问题。Han 等人提出了利用性能函数的梯度来建立微器件的稳健优化模型, 同时也将其应用于一些器件的研究中, 如微加速度计、微探针和微机械陀螺中^[1,3]。其采用了有限元建立器件模型, 同时采用设计优化工具(Design Optimization Tools, DOT)进行优化。基于有限元模型的稳健优化需要详尽的几何信息, 而且有限元法使用偏微分方程求解, 因此, 对于多物理场仿真(如微陀螺设计需要进行机电耦合场分析)来说计算效率很低且计算繁琐。Coulter 等人提出了考虑变量容差的方法, 并且将其应用于微加速度计的设计中^[4]。但是其使用的是器件解析模型, 虽然可以极大地提高计算效率, 但是在实际应用中无法保障计算精确度。此外, 由于微陀螺的结构复杂性, 很难获得精确的解析模型。因此, 以往的这些研究对于实际的微陀螺设计而言, 存在着一些局限。

本文提出了一种考虑加工误差的微陀螺稳健优化设计方法。该方法使用灵敏度分析, 将加工误差考虑成最坏情况容差, 研究关键设计参数变异对系统性能的影响。

1 微机械陀螺

本文研究的微机械陀螺由驱动检测框架、U 形梁构成, 如图 1 所示。平衡叉指用梳齿产生静电力来驱动内框

收稿日期: 2010-06-29; 修回日期: 2010-09-08

基金项目: 国防预先研究资助项目-姿态测量传感器

架沿 x 轴方向振动。当微陀螺沿 z 轴旋转时,内框架会感应出科里奥利(Coriolis)力。科氏力引起整个结构沿 y 轴方向振动。检测梳齿检测出 y 方向振动引起的电容变化量,从而可间接获得作用于微陀螺的输入角速率。U 形梁被认为是可降低梁结构的残余应力^[5],同时能确保检测框架在检测方向是 1 自由度振动。因此,检测模态被解耦,降低了零输入偏差^[6]。微陀螺的动力学方程为^[7]:

$$\begin{cases} m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + c_x \frac{dx}{dt} + k_x x = f_0 \sin(\omega_d t) \\ m_y \frac{d^2 y}{dt^2} + c_y \frac{dy}{dt} + k_y y = 2m_x \Omega_z \frac{dx}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为结构质量; c 为阻尼系数; k 为梁刚度; f_0 为驱动力振幅; ω_d 为驱动频率; Ω_z 为输入角速率(常数)。设计变量是驱动梁和检测梁的宽度和长度。内外框架和梳齿尺寸被预定义为常数。整个陀螺结构尺寸为 $2\,150\,\mu\text{m} \times 2\,100\,\mu\text{m}$ 。器件厚度为 $60\,\mu\text{m}$ 。为了获得较高的品质因子,陀螺采用真空封装。

如前所述,对于多物理场分析,有限元模型效率低且繁琐。商业化的微机电系统设计工具 CoventorWare 适合器件级仿真,其采用的是基于代码的降阶模型(宏模型),可以保证计算效率同时能获得可接受的计算精确度,且很容易进行多场仿真。

微陀螺的系统模型由机械部件(框架、梁和梳齿)、电学部件(激励源)和阻尼模型构成。结构参数被定义在宏模型中,作为设计变量。

2 微机械陀螺的稳健设计

2.1 最优化设计与稳健设计

最优化问题可表述为:找到 1 组设计变量 X , 使目标函数 $\Phi(X)$ 在约束 $G(X)$ 下具有最优值(最小或最大),如式(2):

$$\begin{cases} \min \Phi(X) \\ \text{subject to } G(X) \leq 0, X_L \leq X \leq X_U \end{cases} \quad (2)$$

式中 X_L, X_U 分别是 X 的上下边界。

可以看出,这种确定性优化没有考虑不确定性影响,如加工误差引起的设计变量变异。因此,大多数表征全局最优的最优化设计可能对不确定变量敏感。在最优化模型(式)中考虑变量的不确定性,就可以建立稳健优化模型。稳健设计的结果对变异不敏感(稳健),同时也具有较好的性能。一种方法是基于质量工程的稳健设计,其假设设计参数是随机变量,设计目标是确定目标函数的均值和标准差,并使其最小,如式(3):

$$\min \Phi[E(X)] = \mu_y + \beta \sigma_y \quad (3)$$

式中 β 是权重系数。这种方法需要知道详尽的统计信息,因此限制了其实用效果;另一种方法是基于灵敏度分析的设计即最小化目标函数对不确定变量的灵敏度,通常是将灵敏度条件考虑成设计约束。

由于微机械陀螺的复杂度,本文的优化算法采用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)。遗传算法采用的是随机搜索和全局寻优方法,对目标函数和设计空间要求较低(如不需要函数连续、光滑),因此与传统的优化算法(如基于梯度的优化算法)相比,能快速收敛到全局最优上,非常适合微机械陀螺结构的优化设计^[4]。

2.2 微机械陀螺稳健优化设计

2.2.1 稳健优化模型

获得高的检测电容值是微机械陀螺的设计目标,这意味着驱动和检测模态的谐振频率差应尽可能小^[8]。之前有报道提出采用谐振频率差作为设计目标函数^[1],考虑到检测电容可以直观全面反映微机械陀螺的设计目标,将最大化检测电容作为设计目标,而将谐振频率差作为设计约束,最优化设计可公式化表述为:

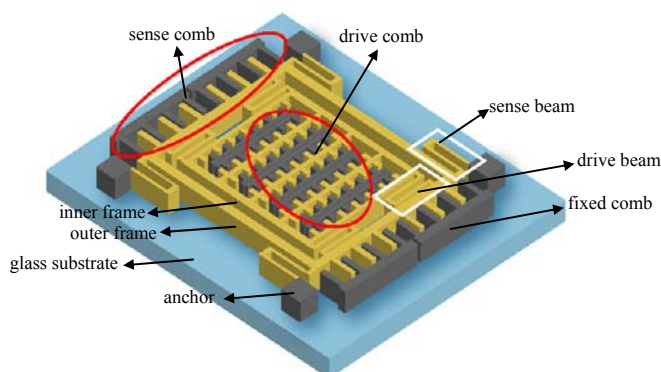


Fig.1 Structure of decoupled microgyroscope

图1 微机械陀螺结构

$$\left\{ \begin{array}{l} \max C_{\text{sense}} \\ s.t. \quad 8\,500 \text{ Hz} \leq f_x, f_y \leq 13\,000 \text{ Hz} \\ \quad 5 \text{ Hz} \leq f_y - f_x \leq 200 \text{ Hz} \\ \quad 5\,000 \text{ Hz} \leq f_x - f_z \\ \quad 5\,000 \text{ Hz} \leq f_y - f_z \end{array} \right. \quad (4)$$

检测电容 C_{sense} 和 3 个模态谐振频率(f_x, f_y, f_z)可以通过微陀螺的系统模型仿真获得。第 1 个约束是限制工作谐振频率范围;第 2 个约束限制模态频率差的值,这里 $f_y > f_x$ 是为了确保 f_y 具有一定的调节余量,因为静电负刚度效应会导致 f_y 降低^[5]。最后 2 个约束是保证不需要的谐振模态 f_z 远离工作模态频率(f_x, f_y)。

在实际设计中,很难获得详细的设计变量统计信息,以及微陀螺的精确解析模型。考虑到采用深反应离子刻蚀(Deep Reactive Ion Etching, DRIE)加工的微陀螺,其结构几何尺寸具有近似 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的误差^[4],本文提出将该误差作为最坏情况容差,用于目标函数的灵敏度分析。主要原理是,把最坏情况容差作为系统扰动,最小化目标函数对容差的灵敏度。

2.2.2 设计流程

首先,求解式(4)的确定性优化问题,以获得满足约束条件的最优解。当然,这里暂未考虑加工误差的影响。需要注意的是全局最优解可能是非稳健解。在这些优化设计结果中也包含有稳健解。接下来对上述优化结果进行稳健分析:确定目标函数和约束对不确定变量的灵敏度。当选择最坏情况容差 Δx 为不确定量时,其对性能参量 F (对于微机械陀螺,性能参量是检测电容 C_{sense} 和谐振频率差 $f_y - f_x$) 的影响可定义为:

$$\text{sensitivity} = \frac{\Delta F / F}{\Delta x / x} \quad (5)$$

为了进行平均意义上的比较,性能的相对改变量表示为:

$$\Delta F / \Delta x = \frac{\text{sensitivity} \cdot F}{x} \quad (6)$$

稳健优化设计流程如图 2 所示。整个设计环境在优化器 modeFRONTIER 中进行。首先随机设置 1 组初始设计变量。然后调用在 CoventorWare 建立的器件级模型,并为模型中的结构变量赋值。接下来,将仿真结果,如检测电容、谐振频率等,输入到最优化模型中,从而执行优化进程。第 2 个模块进行稳健设计分析:根据前面得到的优化结果,计算其目标函数和约束的灵敏度。此外,蒙特卡洛分析也被用来分析稳健设计的性能分布。最后的物理级验证模块执行有限元仿真,以检验设计结果。

3 仿真结果

3.1 优化进程

遗传算法的参数设置:种群大小为 10;遗传代数为 200;交叉概率为 0.5;选择概率为 0.05;变异概率为 0.1。优化进程在 PC 机(Intel Core2 Duo CPU E8400@3.00 GHz, 2.00 GHz memory)上运行,耗时 540 min。

3.2 使用最坏情况容差的灵敏度分析

首先需要确定设计变量中哪些参数对微陀螺性能影响最大。根据式(6),可计算出模态频率差的相对改变量(见表 1)。梁宽 w_3 (w_5) 发生 $1 \mu\text{m}$ 的改变会导致 f_x (f_y) 改变 664 Hz(952 Hz),而相同的梁长度 l_3 (l_5) 改变导致 f_x (f_y) 变化 20 Hz(36 Hz)。因此, w_3 和 w_5 是微陀螺稳健设计中的关键参数。

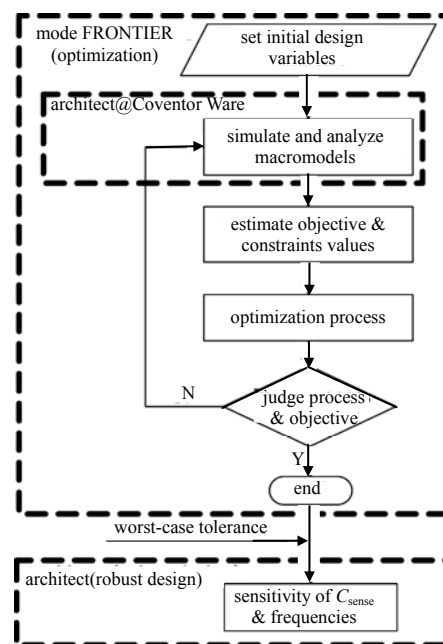


Fig.2 Robust optimization flow chart
图 2 稳健优化设计流程图

使用优化结果对频率差约束进行灵敏度分析。图 3(a)描述了在不同的优化设计中,梁宽发生 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 扰动时,频率差的改变量,图中清楚地表明设计 5 的改变量最小,即对于频率差而言,设计 5 的陀螺结构是稳健的。采用同样的方法进行目标函数的灵敏度分析(图 3(b))。虽然设计 3 和设计 6 的检测电容值在 $-0.5\text{ }\mu\text{m}$ 误差处增大,但是 f_y 已经小于 f_x , 这违反了约束 $f_y > f_x$ 。

选择设计 5 作为稳健设计,对其做进一步的分析。使误差值在 $-1.2\text{ }\mu\text{m} \sim 1.2\text{ }\mu\text{m}$ 范围内改变,然后考察误差对频率差和检测电容的影响。图 4 表明在 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 的容差范围内,误差对频率差和检测电容的影响很小,频率差的改变量为 125 Hz ,检测电容的改变量为 1.5 fF ,因此当前的设计在该容差范围内被认为是可接受的。 $C_{\text{sense}}, f_x, f_y$ 的名义值分别是 $2\text{ fF}, 9\text{ }010\text{ Hz}$ 和 $9\text{ }198\text{ Hz}$ 。表 2 是最终的稳健设计尺寸参数。

表 1 参数变异导致的频率变化

Table1 Frequencies change to parameter variation	
mode	relative sensitivity/(Hz/ μm)
x	$\Delta f_x/\Delta l_3 = 20, \Delta f_x/\Delta w_3 = 664, \Delta f_x/\Delta w_4 = 18, \Delta f_x/\Delta w_5 = 6$
y	$\Delta f_y/\Delta l_5 = 36, \Delta f_y/\Delta w_5 = 952, \Delta f_y/\Delta w_6 = 32, \Delta f_y/\Delta w_3 = 17$

表 2 稳健优化设计结果

Table 2 Results of robust optimal design	
design parameters	value/ μm
drive beam	length 400
	width 16.0
sense beam	length 460
	width 20.5

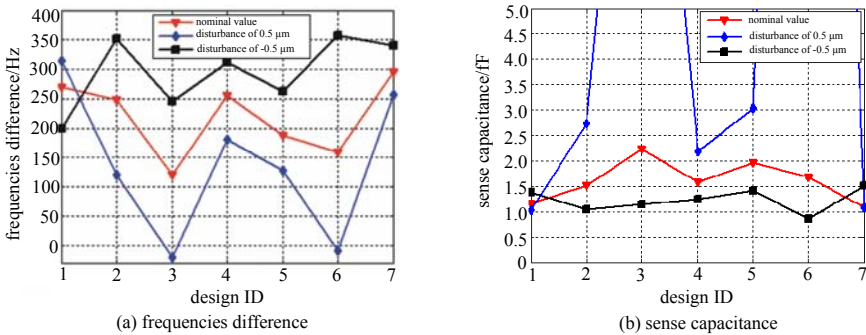


Fig.3 Sensitivity analysis
图 3 灵敏度分析

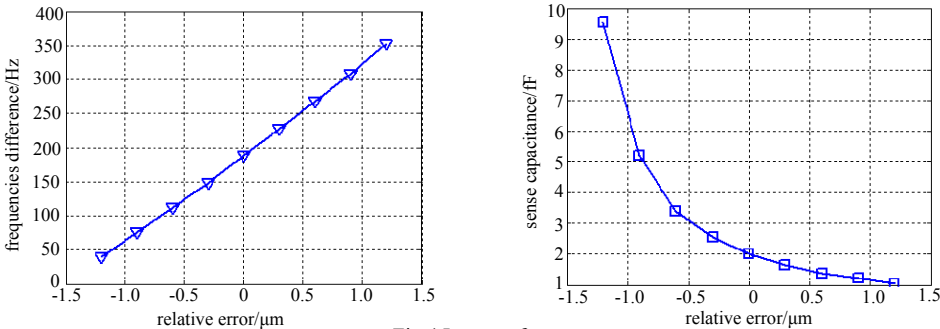


Fig.4 Impact of error
图 4 加工误差的影响

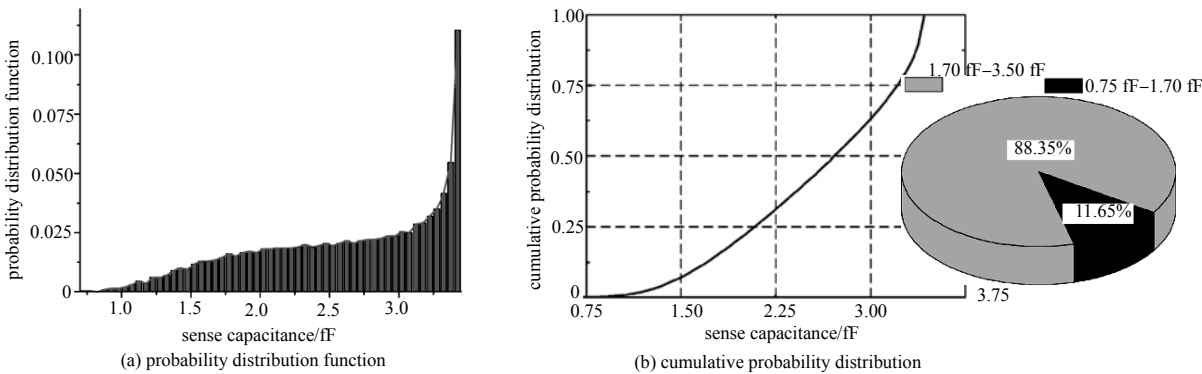
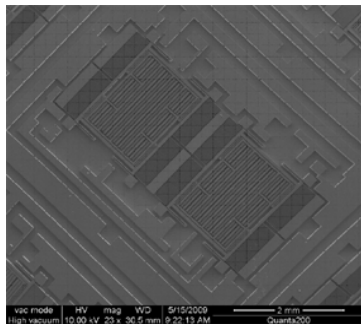


Fig.5 Results of Monte Carlo analysis
图 5 蒙特卡洛仿真结果

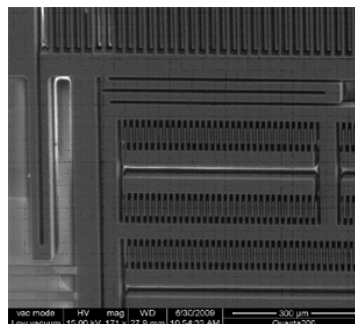
3.3 蒙特卡洛仿真分析

通过蒙特卡洛分析,能够获得结构失效概率。根据前面提到的近似 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 的最坏情况容差设定,可以做如下合理假设:加工误差服从正态分布,均值为各设计变量的名义值, $3\sigma = 0.4 \mu\text{m}$,检测电容的概率分布可通过蒙特卡洛仿真计算(样本数设为 2 000),如图 5 所示。可以看出对于检测电容,有 88.35% 的样本从 1.7 fF~3.5 fF 变化。因此,可以认为设计 5 的检测电容对于随机误差不敏感。

根据上述稳健优化设计获得的结构参数,已经采用键合—深刻蚀体硅工艺加工出微机械陀螺,如图 6。为了消除 y 轴的加速度影响,最终的器件被设计成由 2 个几何形状相同但是驱动相反的结构组成。



(a) gyroscope structure



(b) U-shaped beam

Fig.6 SEM photos of fabricated MEMS gyroscope structure and beams

图 6 加工陀螺整体结构和梁的 SEM 照片

4 结论

本文提出一种有效的用于微陀螺结构设计的稳健优化方法。该方法使用灵敏度分析理论,同时考虑了最坏情况容差。因此,不需要已知详尽的设计变量统计信息。使用降阶模型代替有限元模型能够提高优化效率。灵敏度和蒙特卡洛分析结果表明所设计的结构具有较好的稳健特性。

参考文献:

- [1] Han J S, Kwak B M. Robust optimal design of a vibratory microgyroscope considering fabrication errors[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2001, 11(6):662-671.
- [2] Wu D H, Tsai Y J, Yen Y T. Robust design of quartz crystal microbalance using finite element and Taguchi method[J]. Sensor and Actuators B, 2003, 92(3):337-344.
- [3] Han J S, Kwak B M. Robust optimization using a gradient index: MEMS applications[J]. Struct. Multidisc. Optim., 2004, 27(6):469-478.
- [4] Coultate J K, Fox C H J, McWilliam S, et al. Application of optimal and robust design methods to a MEMS accelerometer[J]. Sensor and Actuators A, 2008, 142(1):88-96.
- [5] Clark W A. Micromachined Vibratory Rate Gyroscopes[D]. USA: University of California Berkeley, 1997.
- [6] Alper S E, Akin T. Symmetrical and decoupled nickel microgyroscope on insulating substrate[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 115(2-3):336-350.
- [7] Acar C. Robust Micromachined Vibratory Gyroscopes[D]. USA: University of California Irvine, 2004.
- [8] 唐海林, 程永生, 苏伟. 微机械梳状陀螺仪的瞬态分析[J]. 信息与电子工程, 2004, 2(2):40-42. (TANG Hailin, CHENG Yongsheng, SU Wei. Transient analysis of a micro gyroscope[J]. Information and Electronic Engineering, 2004, 2(2):40-42.)

作者简介:



周 浩(1976-), 男, 四川射洪人, 在读博士研究生, 主要研究方向为微机械电子系统器件设计、结构优化. email: chinamems@163.com.

苏 伟(1964-), 男, 四川射洪人, 研究员, 主要从事 MEMS 基础科学和微惯性器件的研究。

唐海林(1979-), 男, 广西桂林人, 硕士, 主要从事惯性传感器与 MEMS 技术以及工艺研究。

刘显学(1980-), 男, 广西柳州人, 硕士, 主要研究方向为惯性测量与 MEMS 技术。