

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2209337

一种系统级微机械振动陀螺的设计与仿真*

卢缘钦 刘恒 华国环

(南京信息工程大学电子与信息工程学院 南京 210044)

摘要: 针对微机械传感器设计存在的流片成本高、耗时长等问题,在 ConventorMEMS+ 和 Matlab/Simulink 环境下设计了一种静电驱动的微机械振动陀螺,对模型进行系统级的仿真测试。通过模态分析、直流分析、交流分析等方法优化模型结构,同时结合虚拟体硅刻蚀工艺抽取建立了微机械振动陀螺的传递函数模型,在 Simulink 中进行系统级仿真分析,获得了系统的暂态响应,确定其在开环条件下的谐振频率、安全工作电压、最佳驱动电压频率等关键参数,并得到谐振频率随梁的长度、宽度参数变化的关系。经测试,在工作电压和其他条件相同的情况下,微机械振动陀螺在需要检测的两个模态上谐振频率与仿真分析结果相差仅约 3.8% 和 0.4%,说明系统级仿真结果可以为后续微机械陀螺闭环测控电路设计提供理论和实验依据。

关键词: 微机械振动陀螺;系统级仿真;工艺参数分析;开环测试

中图分类号: TN824 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Design and simulation of a system-level micromachined gyroscope

Lu Yuanqin Liu Heng Hua Guohuan

(School of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To solve the problem of high cost and time consuming when the key parameters of micromechanical structure must be encapsulated by wafer flow, an electrostatic driven micromechanical vibration gyro was designed in ConventorMEMS+ and Matlab/Simulink environment, and the model was simulated and tested at the system level. Through modal analysis, DC analysis, AC analysis and other methods to optimize the model structure, combined with virtual body silicon etching process extraction to establish a micromechanical gyro transfer function model, system level simulation analysis in Simulink, obtained the transient response of the system. The key parameters, such as resonant frequency, safe operating voltage and optimal driving voltage frequency, are determined under the condition of open loop, and the relationship between resonant frequency and the length and width of beam is obtained. Under the same working voltage and other conditions, the difference between the resonant frequency and the simulation results is only about 3.8% and 0.4%, indicating that the system-level simulation results can provide theoretical and experimental basis for the subsequent design of the closed-loop measurement and control circuit of the micro-mechanical gyro.

Keywords: micromechanical vibrating gyro; system-level simulation; process parameter analysis; open loop test

0 引言

如何快速化、低成本、高可靠的设计微机械电子系统(MEMS)一直是研究 MEMS 技术应用的一个热点。系统的微机械电子系统设计包括版图结构参数、制造工艺流程、封装、测控电路等设计环节,各个环节相互依存相互影响。目前文献^[1-6]报道的微机械电子系统微结构建模多采用有限元方法分析微结构实体在载荷和能量场下的运动特征,从而获取微结构工作振型的振梁刚度和质量、模态频率、接

口电容等参数。对于测控电路方案设计,则根据微结构和接口电路模块的动力学原理进行建模分析,模型的关键参数来源于微结构实体有限元分析结果和微结构的加工尺寸及封装测试结果。上述开发设计流程每次更新结构尺寸需要重新进行实体建模和有限元仿真,无法直接进行系统级的开环、闭环系统仿真,流片成功率和成品率不高,同时实验成本高、耗时长。微机械振动陀螺作为典型的微机械电子系统,很多文献^[7-12]报到了微机械振动陀螺模态谐振频率和品质因素受材料、工艺等因素影响,对应模态的动力学

收稿日期:2022-03-20

* 基金项目:国家重点研发计划课题(2019YFC1804704)、住房和城乡建设部科学技术项目计划(2019-K-141)资助

参数也会发生变化,从而导致陀螺输出发生偏差。目前微机械振动陀螺动力学参数测试方法^[13-15]主要有 MEMS 运动分析仪测试、振动传感器标定系统测试、动态信号分析仪测试等几种方法,都需要先完成微机械结构的流片封装,存在成本高、时间长等问题。

鉴于上述问题,本论文以 ConventorMP 与 MEMS+ 软件为基础,利用参数化方法建立了微机械振动陀螺的实体模型,并进行了振型模态分析,获得了不同振型下的谐振频率和品质因数。结合虚拟体硅蚀工艺并抽取建立了微机械振动陀螺的传递函数模型,在 Matlab/Simulink 下建立了系统开环仿真模型,获得了系统的暂态响应。并利用软件仿真确定了不同振梁宽度、长度下的谐振频率变化及检测模态的可容许下拉电压,为后续微机械陀螺闭环测控电路设计提供了理论和实验依据。

1 微机械振动陀螺设计

微机械振动陀螺由结构层和电极层构成。如图 1 所示,结构层包括在 XY 轴平面上对称的 4 个用于固定支撑的锚点、用于连接中间的质量块和锚点的 4 根梁,梁与质量块均悬空、X 轴方向上对称的驱动梳齿状结构和 Y 轴上对称的驱动检测梳状结构,梳状结构均分为质量块上的活动梳状结构部分和相对应的固定梳状结构。

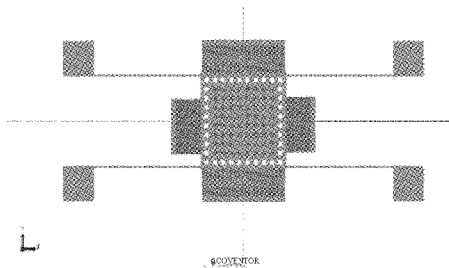


图 1 微机械振动陀螺结构层示意图

如图 2 所示,在各梳状结构和质量块的下方均分布有电极板,质量块与其下侧极板构成检测角速度的电容。驱动梳齿下方的极板引出 2 个电极引线,可在上加交流信号驱动质量块振动。

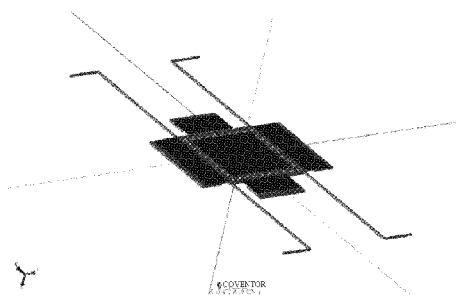


图 2 微机械振动陀螺电极层示意图

微机械振动陀螺仪的工作原理是基于科里奥利力和共振两个基本的现象。微机械陀螺由悬在梁上的质量块和用

于驱动、检测的梳状结构构成,梁又固定在锚点上,所以这种装置可以理解成质量块-弹簧-阻尼系统。施加在驱动梳状结构上的电压使质量块振动,施加在检测方向上的电压则可以检测电容的变化,并将其最终转化为角速度的量。

当物体绕 X 轴旋转,同时沿 Y 轴以线速度 \vec{v} 移动,在 Z 轴上就会出现额外的非零力,即科里奥利力 F_C ,其值为:

$$F_C = -2m(\vec{\Omega} \times \vec{v}) \quad (1)$$

式中: $\vec{\Omega}$ 是角速度, \vec{v} 是线速度, m 是物体质量。

如图 3 所示,把驱动电压作用于驱动梳状结构上,质量块沿 Y 轴方向左右振动,通过 X 轴方向上的驱动检测梳状结构的差分输出电容来判断质量块是否处在横幅谐振。当 X 轴存在角速度 $\vec{\Omega}$ 时,质量块受到 Z 轴方向的科里奥利力,检测模态的电容发生变化,通过接口电路将电容变化转换为电压再解调就能得到 X 轴方向上的角速度。

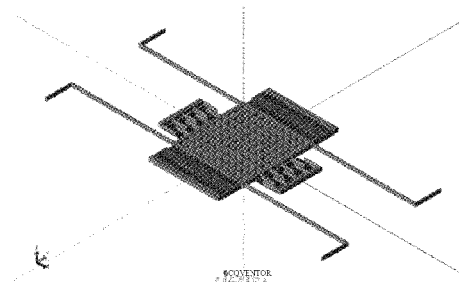


图 3 微机械振动陀螺结构图

把这一微机械振动陀螺视为质量块-弹簧-阻尼系统,其简化动力学模型可用如下两个方程表示:

$$M_d \ddot{y}(t) + \lambda_d \dot{y}(t) + k_d y(t) = F_C \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$M_s \ddot{z}(t) + \lambda_s \dot{z}(t) + k_s z(t) = 2M_s \Omega \dot{y}(t) \quad (3)$$

式中: M_d, M_s 分别是驱动结构质量、检测结构质量, k_d, λ_d 分别是驱动模态的弹性系数、阻尼力系数, k_s, λ_s 分别是检测模态的弹性系数、阻尼力系数。对位移 $y(t), z(t)$ 分别求一次导、二次导就是对应的速度和加速度。

在设计微机械振动陀螺中,驱动、检测模态的弹性系数由梁的等效刚度替代。当驱动模态处于横幅谐振时,驱动力远大于科里奥利力,可以忽略科里奥利力对驱动模态位移的影响,得到驱动、检测模态位移的解为:

$$x(t) = \frac{A_d \cdot Q_y}{\omega_y^2} \cos\left(\omega_y t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

$$y(t) = -\frac{2\Omega A_d m_s Q_d}{m_s \omega_y^2} \sin(\omega_y t) \quad (5)$$

式中:假定驱动力 $F_x = A_d \cos(\omega_d t)$, A_d 为驱动力幅值, ω_d 为角频率; $\omega_y^2 = k_y/m_y$; $Q_y = m_y \omega_y / c_y$ 。

检测模态采用平板电容,检测电容 C_s 可以表示为:

$$C_s(t) = \frac{\epsilon \cdot S}{d_0 - z(t)} \quad (6)$$

式中： ϵ 为介电常数， S 为平板正对面积， d_0 为质量块与其下侧电极板之间的间距， $z(t)$ 为质量块在 Z 轴方向上的位移。该式说明检测电容大小与检测模态位移成线性关系。

驱动检测模态采用差分梳齿电容对，检测电容 C_{DS1} 和 C_{DS2} 及差分检测电容 C_{DS} 为：

$$C_{DS1}(t) = \frac{n_1 \cdot \epsilon \cdot [l + y(t)] \cdot h}{d_1} \quad (7)$$

$$C_{DS2}(t) = \frac{n_1 \cdot \epsilon \cdot [l - y(t)] \cdot h}{d_1} \quad (8)$$

$$C_{DS}(t) = C_{DS1}(t) - C_{DS2}(t) = \frac{2n_1 \cdot \epsilon \cdot y(t) \cdot h}{d_1} \quad (9)$$

式中： n_1 为驱动检测梳齿电容对数量， h 为梳齿的厚度， d_1 为 X 轴上活动梳齿与固定梳齿间的间距。该式表明驱动检测梳齿电容大小与驱动导致振动的位移 $y(t)$ 成正比。

差分驱动梳齿产生的静电驱动力 $F_c(t)$ 为：

$$F_c(t) = 4n_2 \cdot \epsilon \cdot h \frac{V_d \cdot V_a \cos(\omega_d t)}{d_2} \quad (10)$$

式中： n_2 为驱动梳齿电容对数量， d_2 为 Y 轴上活动梳齿与固定梳齿间的间距， V_d 为加在驱动梳齿对上的直流偏置电压， $V_a \cos(\omega_d t)$ 为加在驱动梳齿对上的交流电压。

2 振型模态仿真分析

本文设计的微机械振动陀螺模型的参数及环境条件设置如表 1 所示。

表 1 模型及环境参数

参数名	值
温度/K	273
压强/Pa	101 325
梁宽/ μm	7
梁长/ μm	600

设计微机械振动陀螺的主要问题之一在于如何获取尽可能大的检测方向上的输出信号。本设计检测的信号是电容大小，这与科里奥利力引起的质量块位移有直接的联系，从上文分析可知这与驱动模态的振动幅度大小有关，当外部振动频率等于某一固有谐振频率时，质量块在这一方向上位移最大，检测这一方向位移变化的电容大小改变最大，信号的放大幅度也就达到最大，所以为了获得检测方向上的最大振幅，驱动模态应处于谐振状态。

这就必须先进行模态分析，以便获得特定模态的值及其相应的结构变形。图 4 给出了直流电压仿真的模态分析图形结果，从图中可以直观的看到结构的变形情况。

表 2 分别显示了 10 种模态，品质因素 Q 、最大位移和旋转节点的特征频率。可以看到， Y 轴方向的最大位移幅度对应第一种模态，此时频率为 6 836.72 Hz，品质因素 Q 为 1 728.23； Z 轴方向的最大位移幅度对应第 2 种模态。

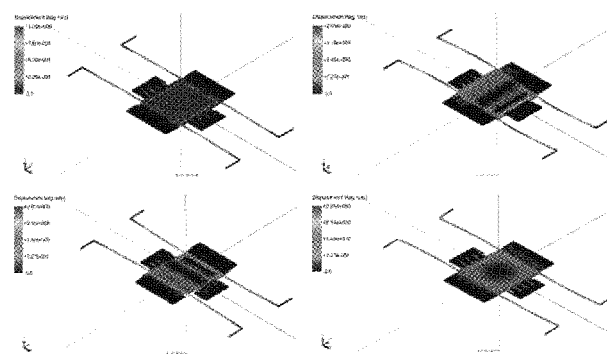


图 4 模态分析图形结果

表 2 模态分析结果

	模型频率/ Hz	品质 因素 Q	最大位移 方向	最大旋转 角度方向
1	6 836.72	1 728.23	M1_y	—
2	7 056.68	858.615	M1_z	—
3	13 246.3	72.178 9	—	M1_rx
4	26 218	29.201	—	M1_ry
5	28 410	26.676 3	—	—
6	35 321.2	21.025	—	—
7	179 569	3.934 24	—	—
8	180 939	3.903 38	—	—
9	181 789	3.884 46	—	—
10	190 831	3.693 56	—	—

3 Simulink 系统级仿真分析

MEMS 通常使用 CAD 软件设计，结构设计完成后需要将模型转换成其他类型的文件并导入额外的软件进行模拟仿真。如果需要多次修改模型，会非常耗费时间。所以本文使用 ConventorMEMS+ 软件进行微机械振动陀螺的设计，它具有 Matlab/Simulink 接口，可使得设计、建模和仿真相统一。

本文设计的微机械结构采用单晶硅，通过掺杂高浓度的硼来改变导电性，用虚拟体深硅刻蚀工艺制造，工艺流程如图 5 所示。

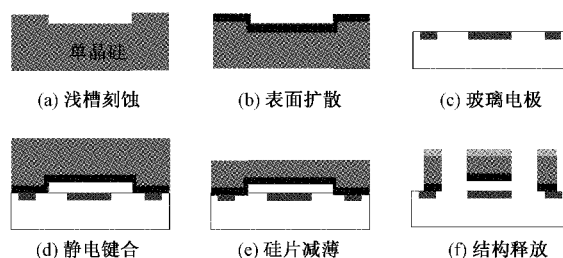


图 5 体硅工艺流程

结合该工艺抽取建立了微机械振动陀螺的传递函数模型，本文的系统级仿真使用如图 6 所示的 Simulink 模型进行。

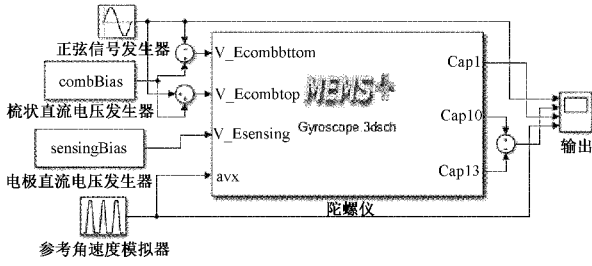


图 6 Simulink 环境下陀螺模型仿真图

首先确定不同振梁宽度和长度下的谐振频率变化情况。针对本设计,影响其固有谐振频率和位移的主要因素是梁的等效刚度 σ ,它的计算公式为:

$$\sigma = \frac{M}{\gamma \cdot W} = \frac{3F \cdot l}{\gamma \cdot w \cdot h^2} \quad (11)$$

式中: M 为矩形梁的弯矩, γ 为截面塑性发展系数, W 为矩形梁的净截面模量, F 为梁所受外力, l 为梁的长度, w 为梁的宽度, h 为梁的高度。

由式(11)可知,梁的宽度与长度均会对其等效刚度产生影响,进而影响到微机械结构的谐振频率。下面对梁的宽度和长度进行扫描分析,宽度范围 $7 \sim 9 \mu\text{m}$,步进为 $0.5 \mu\text{m}$,长度范围 $594 \sim 606 \mu\text{m}$,步进为 $3 \mu\text{m}$,得到梁在不同宽度和长度情况下的频率响应曲线。

如图 7 所示,随着梁宽度增加,微机械振动陀螺的谐振频率增大,检测模态的最大位移随之减小;如图 8 所示,随着梁长度增加,微机械结构的谐振频率减小,检测模态的最大位移随之增大,这与式(11)的分析一致。

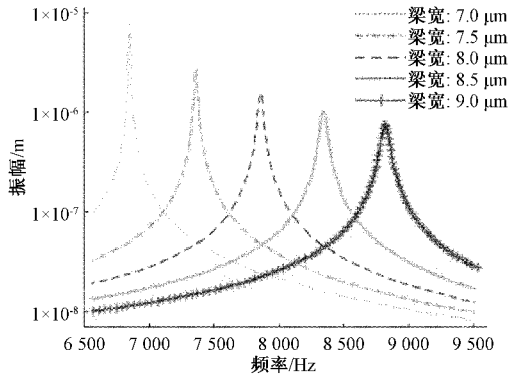


图 7 梁宽度参数频率扫描图

接着对微机械陀螺的拉入效应进行仿真分析。在质量块及其下方的电极板之间施加一直流偏置电压,当电压达到临界电压值时,物理平衡点将失去稳定性。所以对微机械陀螺的拉入效应进行分析可以得到安全的工作电压范围。模拟的电压范围从 $0 \sim 4 \text{ V}$,步长为 0.1 V ,仿真以直流扫描的方式进行。

如图 9 的拉入效应分析结果所示,在梁长度为 $600 \mu\text{m}$,宽度为 $7 \mu\text{m}$ 时,驱动梳状结构产生的静电力可以克服拉入电压约为 3.6 V 时结构的弹簧力。这说明当其工作电压小于等于 3.6 V 时,质量块与其下册电极板并不会吸附贴合,

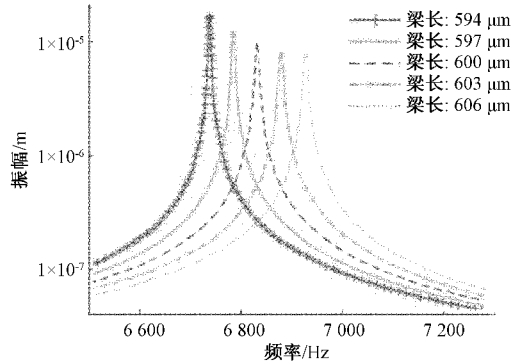


图 8 梁长度参数频率扫描图

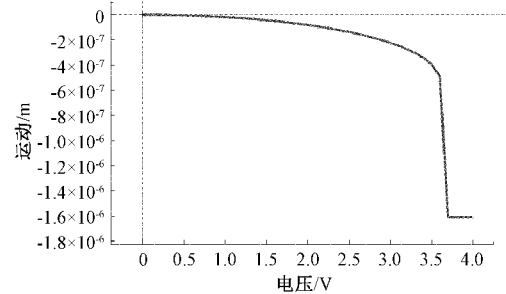


图 9 拉入效应 DC 扫描曲线图

微机械振动陀螺可以正常工作。

下面对本微机械结构设计进行暂态响应分析,通过给定不同的角速度大小,仿真得到检测电容和驱动频率检测电容信号的曲线。

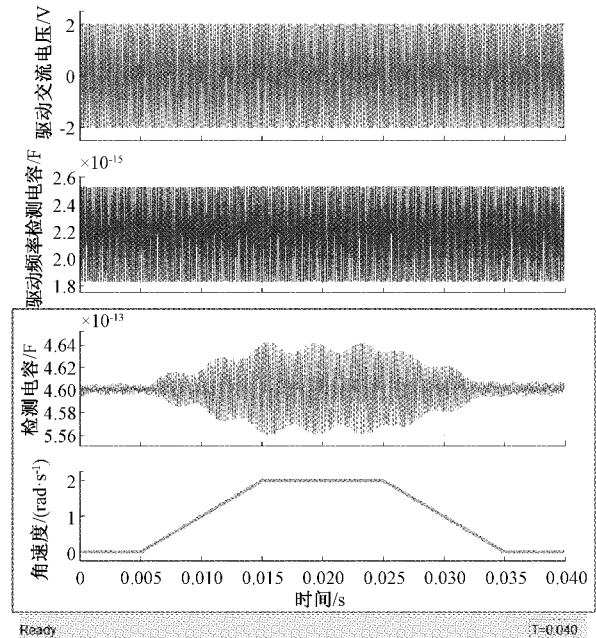


图 10 瞬态分析结果

对设计的微机械振动陀螺进行持续时间为 0.04 s 的瞬态分析,结果如图 10 红框标注部分所示。当角速度为 0 时,检测电容输出信号稳定;当角速度逐渐增大时,检测电

容开始随之明显增大;当角速度值稳定在 2 rad/s 时,检测电容值的变化又变为稳定,设计输出信号随角速度变化的响应非常及时,这有利于精确、及时的测量出角速度的大小。

另外,如图 11 红框部分所示,驱动电压频率与驱动检测频率始终保持一致,使后续微机械振动陀螺的闭环驱动设计成为了可能。

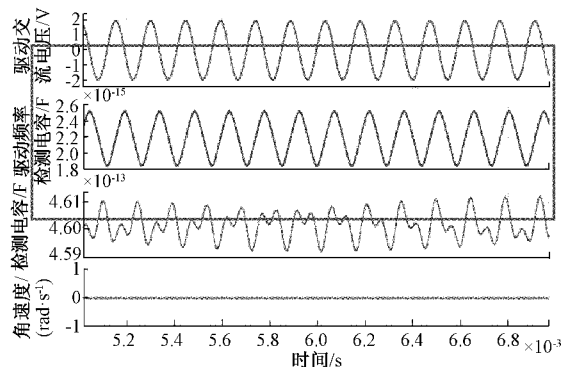


图 11 瞬态分析放大部分图

4 验证测试

对微机械振动陀螺及电路系统级的仿真分析进行验证,结果如图 12~13 所示。将微机械振动陀螺设定与仿真时一致的工作电压,其他条件参数也保持一致,对驱动电压频率进行扫频,得到与检测电容有关的波特图。具体观察第一和第三模态的谐振频率值,它们反应了振动陀螺在检测电容和驱动频率检测电容两个信号上的精确度。发现第

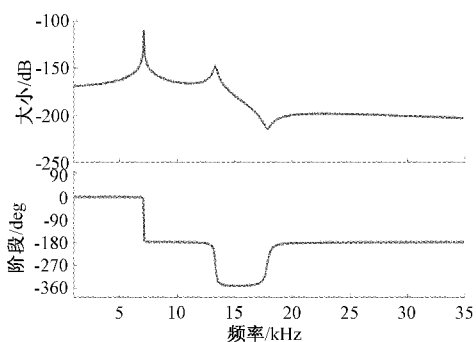


图 12 检测信号波特图

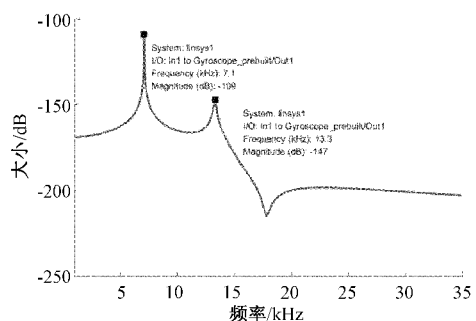


图 13 检测信号幅频响应曲线

一模态的谐振频率为 7.1 kHz,与系统级仿真分析得到的谐振频率 6 836.72 Hz 相差约 3.7%;第三模态的谐振频率为 13.3 kHz,与系统级仿真分析得到的谐振频率 13 246.3 Hz 相差约 0.4%。说明系统级仿真结果可信,能使得微机械振动陀螺的设计、建模和仿真相统一。免去了微机械传感器设计需要先流片再测试验证导致的成本高、耗时长等问题。

5 结 论

设计了一种微机械振动陀螺,分析其工作原理并推导表达式,并在 ConventorMEMS+ 和 Matlab/Simulink 环境下对其进行系统级的仿真分析。通过模态分析、直流分析、交流分析等方法优化其结构,确定在开环条件下的谐振频率、安全工作电压、最佳驱动电压频率等。同时考虑了实际生产中的工艺问题,对不同工艺参数带来的谐振频率改变进行仿真分析,得到谐振频率随梁的长度、宽度变化关系。对系统进行瞬态分析,实现了快速系统级设计。经验证测试,系统级仿真误差小,可以为后续实现闭环驱动电路设计提供理论和现实依据,避免了传统微机械传感器设计方法存在的流片成本高、耗时长等问题。

参考文献

- [1] 李开富,蒋婷,郭小伟,等. 三质量块 MEMS 三轴电容式加速度计的设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(10):193-201.
- [2] JIA J, DING X, QIN Z, et al. Overview and analysis of MEMS Coriolis vibratory ringgyroscope [J]. Measurement, 2021, 182, DOI: 10. 1016/j. measurement. 2021. 109704.
- [3] 刘恒,杨添熠,舒进华,等. 一种双框架解耦陀螺的接口电路仿真及实验[J]. 仪表技术与传感器, 2021, 11: 16-22.
- [4] CETIN H, YARALIOGLU G G. Analysis of vibratory gyroscopes: Drive and sense mode resonance shift by coriolis force[J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(2): 347-358.
- [5] 王磊,吴殿吴,张永德,等. 基于磁电编码器 MEMS 陀螺标定及高阶滤波的动态滞后补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(8): 110-119.
- [6] 邓祎昕,郭华玲,郑宾,等. 基于小波模糊阈值去噪方法在 MEMS 加速度计去噪中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(8): 134-138.
- [7] LI W, YANG X, ZHANG W, et al. Modeling and performance investigation of a piezoelectric vibrating gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(21): 9382-9840.
- [8] KHANKHUA S, ASHRAF M W, TAYYABA S, et al. Simulation of MEMS based micro-gyroscope using coventorWare [C]. The 8th Electrical Engineering

- Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand Conference, 2011.
- [9] 张利娟,张华彪,李欣业,等.载体加速度对静电驱动微机械陀螺响应的影响分析[J].振动与冲击,2021,40(5), DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2021.05.008.
- [10] NAZDROWICZ J, NAPIERALSKI A. Modelling, simulations and performance analysis of MEMS vibrating gyroscope in coventor MEMS + environment[C]. 2019 20th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE), 2019.
- [11] BARANOV P, NESTERENKO T, TSIMBALIST E, et al. The stabilization system of primary oscillation for a micromechanical gyroscope [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(6), DOI: 10.1088/1361-6501/aa66c6.
- [12] 刘恒,刘显学,张凤田,等.微机械振动陀螺闭环自激驱动理论分析及验证[J].重庆大学学报自然科学版,2011,34(10):136-141.
- [13] KWON H J, SEOK S, LIM G. System modeling of a MEMS vibratory gyroscope and integration to circuit simulation [J]. Sensors, 2017, 17(11), DOI: 10.3390/s17112663.
- [14] PERL T, MAIMON R, KRYLOV S, et al. Control of vibratory MEMS gyroscope with the drive mode excited through parametric resonance[J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2021: 1-34.
- [15] 陈阳.低成本 MEMS 陀螺频率特性测试方法[J].电子测量技术,2020,43(13):138-142.

作者简介

刘恒,博士,副教授,主要研究方向为微机械传感器设计、数字信号处理等。

E-mail:ghost80boy@163.com