

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2211009

一种高灵敏度电容式波动陀螺的设计与分析*

寇志伟^{1,2} 崔啸鸣¹ 陈苏力德¹ 孔哲¹ 景高乐¹

(1. 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古工业大学内蒙古自治区机电控制重点实验室 呼和浩特 010051)

摘要: 基于固体波动陀螺灵敏度高、可靠性好、动态范围宽等突出优点,本文研究了一种全新的高灵敏度电容式微机电环形波动陀螺。首先设计了微机电环形波动陀螺的敏感结构与整体结构,并分析了工作特性与敏感原理;其次建立了环形敏感结构的灵敏度数值模型,分析了灵敏度与主要设计参数的关系;最后对环形敏感结构进行了模态仿真、静电驱动分析、灵敏度分析与极限位移分析,得到了该微机电环形波动陀螺的谐振频率为 6.036 0 kHz,在 2.906 8 μm 的驱动激励下机械灵敏度为 0.003 6 $\mu\text{m}/^\circ$,最大静态应力为 19.82 MPa。分析结果表明该陀螺敏感结构设计合理,能够实现高灵敏度的角速度敏感,为进一步研制高灵敏度 MEMS 陀螺奠定了基础。

关键词: 微机电系统; 环形波动陀螺; 灵敏度; 敏感结构

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1035

Design and analysis of a capacitive wave gyroscope with high-sensitivity

Kou Zhiwei^{1,2} Cui Xiaoming¹ Chen Sulide¹ Kong Zhe¹ Jing Gaole¹

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Inner Mongolia Key Laboratory of Electromechanical Control, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: In this paper, a new capacitive MEMS ring-shaped wave gyroscope with high sensitivity is studied. Based on the outstanding advantages of the solid wave gyroscope such as high sensitivity, good reliability and wide dynamic range. First, the sensitive part and the whole structure of this MEMS ring-shaped wave gyroscope are designed, and the working characteristics and sensitive principle are analyzed. Then, the numerical model of the ring-shaped sensitive part is established, and the relationship between the sensitivity and the main design parameters is studied. Finally, it is concluded that the resonant frequency is 6.036 0 kHz, the mechanical sensitivity is 0.003 6 $\mu\text{m}/^\circ$ with a driving displacement of 2.906 8 μm , and the maximum stress is 19.79 MPa in the ultimate displacement of the gyroscope, by studying the motion mode, driving method, mechanical sensitivity and ultimate displacement of the ring sensitive structure. The results show that the sensitive structure of the gyroscope is reasonable and has a high sensitivity, it can be used as the basis for the further development of high sensitivity MEMS gyroscope.

Keywords: MEMS; wave gyroscope; sensitivity; ring-shaped sensitive structure

0 引言

微机电(micro-electro-mechanical system, MEMS)陀螺是基于微机械工艺与半导体集成电路技术制造的一种新型的哥氏振动陀螺,用来测量载体的角速率或姿态角^[1-2]。硅微陀螺与传统的机械陀螺、光纤陀螺、激光陀螺相比,具有可靠性高、动态范围宽、体积与质量小、功耗低、适于批量制造、易于电路并行加工与单片集成等突出优点^[3-4]。因此,硅微陀螺受到了世界各国极大的关注,并研制了多种性能

级别的产品,广泛应用于角振动测量、工业控制、运动载体姿态控制、电网线路监测、汽车导航与军事装备等领域^[1,5-6]。

目前,硅微振动陀螺从敏感结构上可以分为振动盘形、振动板形、振动梁形、薄壁半球形与谐振环形等,其工作原理都是基于哥氏效应实现驱动和敏感模态之间的能量转移^[2,7]。随着对 MEMS 陀螺的测量精度、响应速度与稳定性的要求越来越高,设计与研制高性能、高灵敏度的硅微结构已成为 MEMS 陀螺器件实用化的关键。硅微环形波动

收稿日期:2022-08-08

* 基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2020LH06004)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZZ20062)、内蒙古自治区直属高校基本科研业务项目(Y20220113)资助

陀螺的敏感元件为一个轴对称的圆环形振动结构,具有结构简单、制造容易、抗干扰特性与温度特性好、灵敏度高优点^[4,8]。自 1995 年美国学者 Puutty 设计了一种圆环形波动陀螺以来,大西洋惯性系统公司、日本硅传感系统公司、乔治亚理工学院、英国纽卡斯尔大学、韩国亚洲大学、美国 Boeing 公司等均对微机电环形波动陀螺仪开展了研究,并实现了 MEMS 惯性测量单元的工程化,其中 Boeing 公司的微机电硅基环形波动陀螺仪零偏稳定性优于 $0.003^{\circ}/h$,达到了惯导级性能^[3,5]。我国的中科院电子所、国防科技大学、清华大学、东南大学等也对微机电环形波动陀螺仪开展了一系列的研究并取得了一定的进展^[4-5,8]。

微机电硅基环形波动陀螺仪非常适合微电子与 MEMS 制造,而且其潜在的特点具备了研制高性能 MEMS 惯性测量单元的基础^[8-10]。因此本文立足国内的微机电工艺水平,基于环形波动陀螺的工作特性与敏感原理设计了一种全新的静电驱动、电容敏感的高灵敏度环形波动陀螺结构,并进行了分析与仿真,对于促进 MEMS 高灵敏度微机电陀螺仪的研制与工程化具有重要意义。

1 结构设计与工作原理

1.1 敏感结构

本文设计的高深宽比环形敏感结构如图 1 所示,其由中心支撑锚点、S 形高深宽比弹性梁与振动圆环构成。中心支撑锚点是环形敏感结构唯一的独立支撑点,其通过均匀设置的 8 个 S 形弹性梁支撑悬浮的振动圆环,可以使振动圆环具有良好的低阶面内振动挠曲振动模式;S 形高深宽比弹性支撑梁设计能够很好的限制敏感结构的面外运动,降低支撑弹簧的径向刚度系数,提高陀螺的灵敏度。

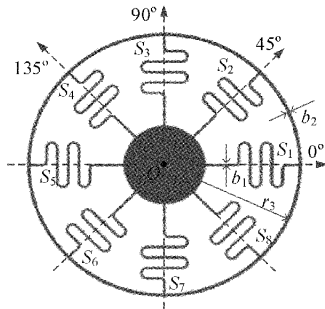


图 1 环形波动陀螺敏感结构

1.2 整体结构

电容式的传感器具有电容变化受温度影响小、稳定好等特点,而且较压电、压阻等信号检测方式而言,其特别适合微机电工艺加工,具有体积小、响应速度快、灵敏度高优点,因此本文研究的环形波动陀螺采用静电驱动、电容检测方式,整体结构如图 2 所示。

环形敏感结构与电容电极材料为单片重掺杂单晶硅晶圆,由深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching, DRIE)工艺整体刻蚀加工而成。振动圆环内部均匀布置了 16 组硅

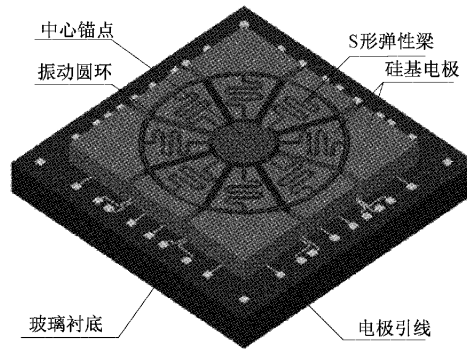


图 2 环形波动陀螺整体结构

电极,振动圆环外部对称了 8 组硅电极,主要用于陀螺的驱动控制、检测控制。

1.3 工作原理

微机电环形波动陀螺敏感结构的面内四波腹挠曲振动可以等效为一个二自由度的弹簧-质量-阻尼系统。对于工作于谐振状态的环形固体波动陀螺,其运动形式可以用二阶线性微分方程描述:

$$\begin{cases} m\ddot{q}_1 + c_1\dot{q}_1 + k_1q_1 = f_1(t) \\ m\ddot{q}_2 + c_2\dot{q}_2 + k_2q_2 = -4\lambda_{12}m\Omega_z\dot{q}_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为等效科氏质量; c_1, k_1, q_1 与 c_2, k_2, q_2 分别为驱动模态与敏感模态的广义振动位移、阻尼系数、弹性刚度; $f_1(t)$ 为驱动模态驱动力; λ_{12} 为敏感结构的角速度增益系数, Ω_z 为输入角速度。

设陀螺驱动电极产生的静电力为:

$$f_1(t) = A_F \sin(\omega_d t) \quad (2)$$

式中: A_F, ω_d 分别为静电力的幅值与频率。

谐振陀螺的驱动模态阻尼比 ξ_1 满足 $0 < \xi_1 < 1$,陀螺稳定工作后驱动模态的稳态振动位移为:

$$q_1(t) = A_1 \sin(\omega_d t - 90^\circ) \quad (3)$$

式中: A_1 为驱动模态位移的幅值。为了获得较高的灵敏度,环形波动陀螺一般工作在频率匹配状态,求解式(1)得到检测模态的稳态振动位移:

$$q_2(t) = 4\lambda_{12}A_1 \frac{Q_2}{\omega_d} \cdot \Omega_z \cos\omega_d t \quad (4)$$

式中: A_2 为检测模态位移的幅值, Q_2 为检测模态的品质因数。

因此,当微机电环形波动陀螺的结构参数与工作状态确定时,其输入角速度 Ω_z 与检测模态的位移成比例,通过检测电容即可解算输入角速度。

2 敏感结构灵敏度分析

取图 1 所示环形敏感结构的 S1 弹性梁,如图 3 所示。由图 1 与图 3 可知,敏感结构的设计参数主要有锚点半径 r_1 、水平梁长度 l_1 、弯曲半径 r_2 、垂直梁长度 l 、弹性梁宽度 b_1 、谐振圆环半径 r_3 与宽度 b_2 、敏感结构高度 h 。

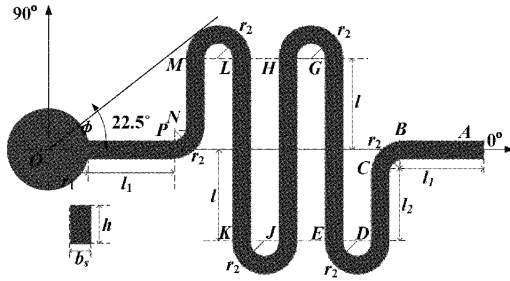


图3 支撑梁的等效结构

根据图3所示的角度与等量关系,设计参数存在约束关系

$$\begin{cases} l = l_2 + r_2 \\ (r_1 + l_1) \tan 22.5^\circ \geq l + 2r_2 \\ r_1 + 10r_2 + 2l_1 = r_3 \end{cases} \quad (5)$$

根据线弹性理论,图3所示弹性梁径向刚度系数 k_r 可表示为:

$$k_r = \frac{Ehb_1^3}{32l^3 + 48\pi r_2 l^2 + 192r_2^2 l + (42\pi - 56)r_2^3} \quad (6)$$

式中: E 为材料的弹性模量。

根据环形敏感结构的面内四波腹运动特性,其等效刚度可以表示为:

$$k_1 = k_2 = k_r + 4k_r \quad (7)$$

式中: k_r 为谐振圆环的等效刚度。

对于环向波数为 n 的振动模式, k_r 为:

$$k_r = \frac{E\pi b_1^3 h n^2 (n^2 - 1)^2}{12r_3^3 (1 - \nu^2)} \quad (8)$$

式中: ν 为材料的泊松比。

环形波动陀螺的机械灵敏度定义为单位角速率输入所产生的敏感结构的输出位移:

$$S_m = \left| \frac{dq_2(t)}{d\Omega} \right| \quad (9)$$

根据二阶线性常系数非齐次微分方程的数值解法,陀螺驱动模式的振幅 A_1 为:

$$A_1 = \frac{A_F}{m\omega_{n1}^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{n1}^2}\right)^2 + 4\xi_1^2 \left(\frac{\omega_d}{\omega_{n1}}\right)^2}} \quad (10)$$

式中: ω_{n1} 为陀螺驱动模式为固有频率。

将式(10)代入式(1)求解检测模式的微分方程,则陀螺检测模式的振幅 A_2 为:

$$A_2 = \frac{4\lambda_{12} m A_1 \omega_d \Omega_z}{m\omega_{n2}^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{n2}^2}\right)^2 + \left(2\xi_2 \frac{\omega_d}{\omega_{n2}}\right)^2}} \quad (11)$$

式中: ω_{n2} 为陀螺检测模式为固有频率。

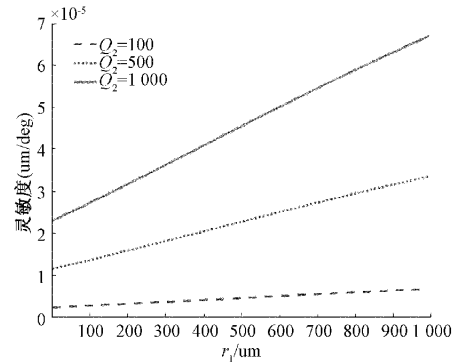
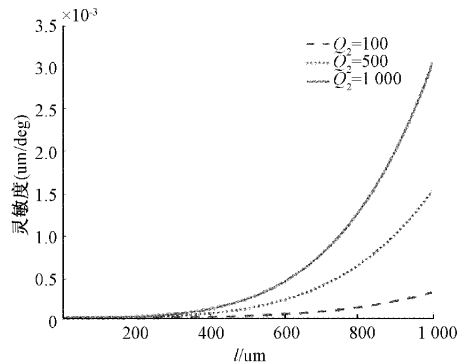
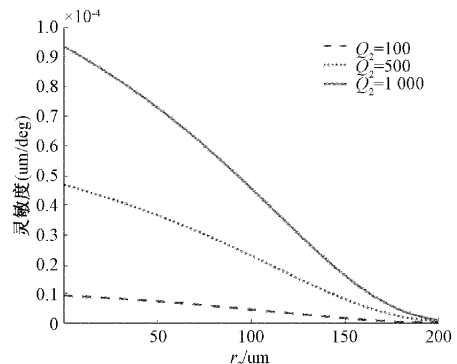
式(6)与(8)代入式(9)得到 MEMS 环形波动陀螺机械灵敏度的一般表达式为:

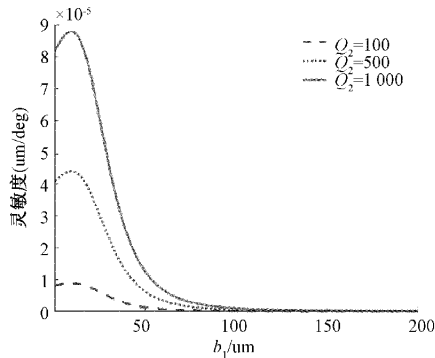
$$S_m = \left\{ \frac{4\lambda_{12} m \omega_d A_F}{k_1 k_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{n1}^2}\right)^2 + \frac{1}{Q_1^2} \left(\frac{\omega_d}{\omega_{n1}}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega_d^2}{\omega_{n2}^2}\right)^2 + \frac{1}{Q_2^2} \left(\frac{\omega_d}{\omega_{n2}}\right)^2}} \right\} \quad (12)$$

式中: Q_1 为陀螺驱动模式的品质因数。

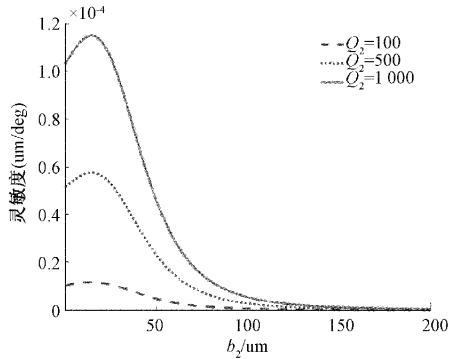
由上式可知,陀螺机械灵敏度与驱动力振幅 A_F 、科氏质量 m 成正比,与敏感结构的弹性刚度成反比,而且很大程度上取决于驱动力频率与工作模式固有频率的关系。

MEMS 环形固体波动陀螺一般工作在模态匹配模式,即 $\omega_{n1} = \omega_{n2} = \omega_d$,此时驱动模式与检测模式均为谐振状态,陀螺仪机械灵敏度达到最大值。设 $A_F = 1.7385 \mu\text{N}$, $Q_1 = 1000$, $\lambda_{12} = 0.37$;选择设计参数 r_1 、 l 、 r_2 、 b_1 、 b_2 绘制灵敏度曲线,如图4所示。

(a) 锚点半径 r_1 与灵敏度的关系曲线(b) 垂直梁长度 l 与灵敏度的关系曲线(c) 弯曲半径 r_2 与灵敏度的关系曲线



(d) 弹性梁宽度 b_1 与灵敏度的关系曲线



(e) 谐振圆环宽度 b_2 与灵敏度的关系曲线

图 4 设计参数与灵敏度关系曲线

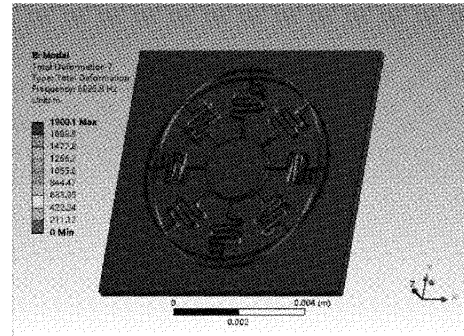
由图 4 可知, MEMS 环形波动陀螺的机械灵敏度与独立设计参数相关, 在驱动模式品质因数与静电力确定的情况下, 机械灵敏度 S_m 随着 r_1 、 l 的增大而增大, 随着 r_2 的增大而减小, 随着 b_1 、 b_2 的增大先增大后减小。本文根据课题要求与 MEMS 工艺水平, 选择的设计参数为 $r_1 = 1\ 000\ \mu\text{m}$ 、 $l = 500\ \mu\text{m}$ 、 $b_1 = 20\ \mu\text{m}$ 、 $b_2 = 40\ \mu\text{m}$ 。

3 敏感结构的仿真分析

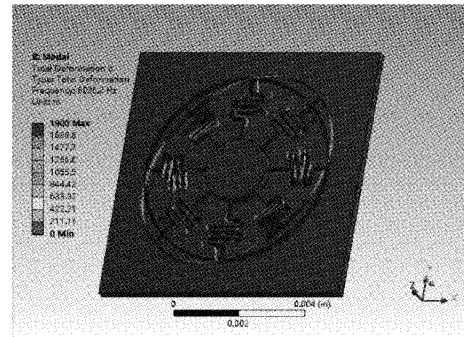
3.1 模态分析

敏感结构的模态分析可以确定陀螺固有频率、振型等特性^[11-12]。应用 ANSYS 有限元软件建立敏感结构有限元模型, 在中心锚点约束后进行模态分析。设置敏感结构为单晶硅材料, 其中密度为 $2.33 \times 10^3\ \text{kg}/\text{m}^3$, 弹性模量为 $1.90 \times 10^{11}\ \text{N}/\text{m}^2$, 泊松比为 0.27。提取前十二阶模态分析, 其中第七阶模态(6.036 kHz)、第八阶模态(6.036 kHz)符合环形波动陀螺的面内四波腹弯曲运动形态, 可以作为该陀螺的驱动模态与检测模态, 如图 5 所示。

由图可知, 环形波动陀螺的工作模式固有频率为 6.036 kHz, 应用合理的电极布置及静电控制技术可使环形敏感结构在静电力的作用下激发图 5(a)所示的模式, 此时环形敏感结构产生了驱动主轴方向的驻波振动, 即为陀螺的驱动模式。当敏感轴方向有角速度 Ω 输入时, 环形敏感结构的振型发生进动, 激发图 5(b)所示模式, 此时环形敏感结构产生了检测主轴方向的驻波振动, 即为陀螺的检测模式。由



(a) 驱动模式的振型



(b) 检测模式的振型

图 5 敏感结构的固有振型

模态分析得知, 该陀螺驱动与检测模式的固有频率差较小(0.4 Hz), 可以实现高灵敏度的角度敏感; 其工作模式(6.036 kHz)与相邻的面内振动干扰模式(4.1463 kHz)的最小频差为 1.8897 kHz, 具有较好的抗干扰特性。

3.2 静电驱动分析

本文研究的 MEMS 环形波动陀螺采用静电驱动方式。设驱动电极施加的直流驱动电压为 V_{DF} , 交流驱动电压为 $v_d(t) = V_d \sin(\omega t)$ V, 则驱动模式主轴方向所受的静电驱动力为:

$$f_1(t) = A_F \sin(\omega_d t) = \frac{2C_{d0}}{x_0} V_{DF} V_d \sin\omega_0 t \quad (13)$$

式中: C_{d0} 、 d_0 分别为环形波动陀螺驱动电容静态值与极距。设 C_{d0} 为 0.35 pF, d_0 为 $8\ \mu\text{m}$, V_{DF} 与 V_d 分别为 10 V、2 V, 则静电驱动力的幅值为 $1.7385\ \mu\text{N}$ 。因此在环形敏感结构的驱动主轴方向(图 1 的 0° 电极轴方向)施加相向的幅值为 $1.7385\ \mu\text{N}$ 的静电力, 然后分析环形敏感结构驱动模式在静电力作用下的幅频响应特性, 如图 6 所示。

由图 6 可知在 $0 \sim 8\ \text{kHz}$ 的频段上在 6.036 kHz 处出现了唯一的响应峰值, 其幅值为 $2.9068\ \mu\text{m}$, 证明环形敏感结构设计正确, 驱动方式合理可行。

3.3 灵敏度分析

根据前述 MEMS 环形波动陀螺工作原理的分析, 检测模式是科氏惯性力激励的受迫运动形式, 由式(1)、(3)得到检测模式所受的科氏惯性力为:

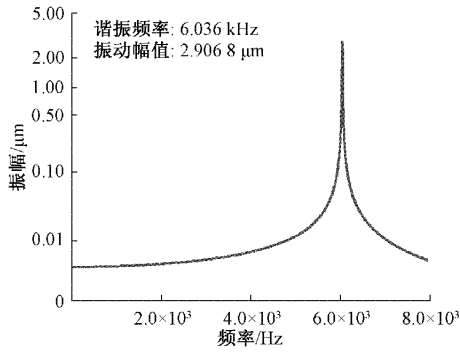


图6 静电驱动的幅频响应特性

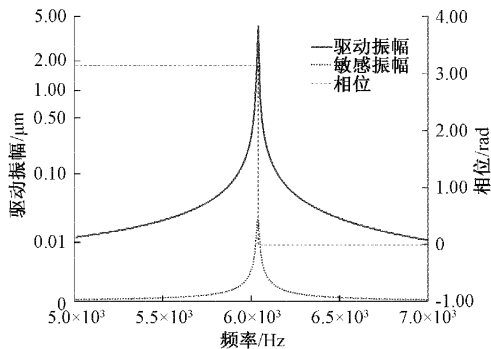
$$f_c(t) = 4\lambda_{12}m \frac{dq_1(t)}{dt} \Omega_z = 4\lambda_{12}mA_1\omega_d\Omega_z \cos(\omega_d t - 90^\circ) \quad (14)$$

选取模态分析与静电驱动分析得到的驱动模态固有频率(6.036 kHz)与幅值(2.9068 μm),选择敏感轴输入角速度 Ω_R 幅值为 0、5、10、20、50、100、200、500°/s 并分别计算其科氏力,并将其加载在环形波动陀螺的检测模态主轴方向,然后分析环形敏感结构检测模态在科氏惯性力作用下的幅频响应特性,分析结果如表 1 所示。

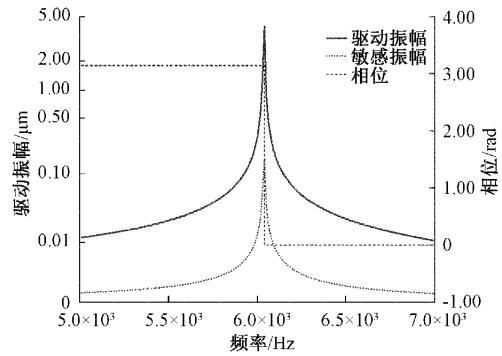
表1 灵敏度分析数据

Ω _R /(°/s)	f _c (t)/μN	A _z /μm	S _m /(μm/°)
0	0	0.000 6	—
5	3.507 2×10 ⁻³	0.018 2	0.003 64
10	7.014 3×10 ⁻³	0.037 0	0.003 72
20	1.402 9×10 ⁻²	0.076 3	0.003 81
50	3.507 2×10 ⁻²	0.184 5	0.003 69
100	7.014 3×10 ⁻²	0.368 2	0.003 82
200	1.402 9×10 ⁻¹	0.772 9	0.003 86
500	3.507 2×10 ⁻¹	2.012 6	0.004 02

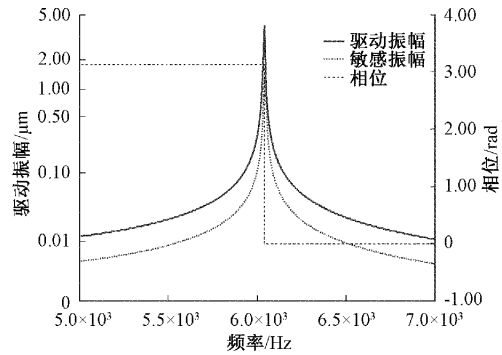
在同样的驱动力条件下,其中敏感轴输入角速度 Ω_R 幅值为 20、100、500°/s 时的幅频响应特性如图 7 所示。



(a) 输入20°/s的幅频响应



(b) 输入100°/s的幅频响应



(c) 输入500°/s的幅频响应

图7 检测模态与幅频响应特性

根据表 1 数据,绘制输入角速度与敏感模态振幅曲线并进行拟合,如图 8 所示,得到该环形波动陀螺敏感结构的机械灵敏度为 0.003 6 μm/°。

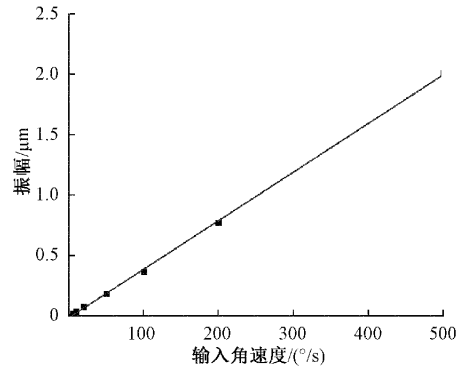
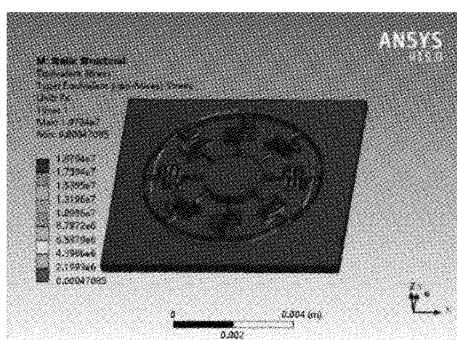


图8 机械灵敏度拟合曲线

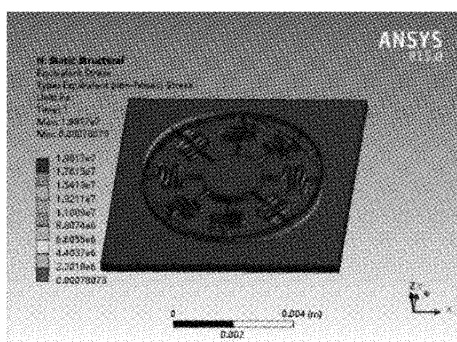
3.4 极限位移分析

当陀螺工作时,驱动电极上施加驱动电压,在驱动电极与环形谐振质量之间产生了以固有频率周期变化的静电力,从而激发陀螺的工作模态。因此对陀螺的驱动模态运动方向施加相当于振幅大小的位移载荷代替静电力载荷,分析陀螺的静力工作状态,从而分析弹性梁与环结构的刚度设计是否合理。设驱动模态的极限位移为 8 μm,分别在驱动模态与检测模态的波腹位置施加 8 μm 的位移载荷进行静力仿真分析,分析云图如图 9 所示。

由图可知,在 0°电极轴方向施加相向的 8 μm 的位移载



(a) 驱动模式方向静力分析云图



(b) 检测模式方向静力分析云图

图 9 极限位移的分析云图

荷时,驱动方向的最大应力为 19.79 MPa;在 45° 电极轴方向施加相向的 $8\ \mu\text{m}$ 的位移载荷时,驱动方向的最大应力为 19.82 MPa。由于环形陀螺结构的对称性及驱动模式、检测模式的振型一致性,可以得出该陀螺在处于工作模式振动位移的极限状态下,应力最大值远远小于硅材料的极限应力。

4 结 论

本文设计了一种高灵敏度的 MEMS 环形波动陀螺结构,其角速度敏感元件采用了 S 形弹性梁的全对称环形波动结构。根据环形波动陀螺的动力学机理及 S 形弹性梁结构理论,建立了环形波动陀螺的灵敏度数值模型,并分析了主要设计参数对灵敏度的影响,优化了设计参数。在此基础上,建立了 MEMS 环形波动陀螺的有限元模型,进行了模态分析、静电驱动分析、灵敏度分析与极限位移分析。分析结果表明该 MEMS 环形波动陀螺结构设计合理,能够实现高灵敏度角速度敏感,而且在结构参数一致性、模态频率匹配性、环境振动干扰抑制等方面也具有较好的性能。此

外, MEMS 陀螺仪的测量灵敏度也与微结构加工封装、测控电路、频率调谐、误差补偿等关键技术密切相关,进一步开展上述方面的研究对于高灵敏度 MEMS 微机电陀螺仪的工程化具有重要意义。

参考文献

- [1] 李永,赵正平. MEMS 陀螺仪的研究现状与进展[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(9): 757-768.
- [2] 丁衡高,朱荣,张嵘,等. 微型惯性器件及系统技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- [3] 曲天良. 半球谐振陀螺研究现状、关键技术和发展趋势分析[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2): 1-16.
- [4] 史文策,许江宁,林恩凡. 陀螺仪的发展与展望[J]. 导航定位学报, 2021, 9(3): 8-12.
- [5] XIA D, CHENG Y, LUN K. The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology[J]. Sensors, 2014, 14(1): 1394-1473.
- [6] 张博,陶亚光,常帅帅,等. MEMS 传感器输电线路舞动轨迹监测[J]. 中国测试, 2022, 48(1): 53-59.
- [7] 卢缘钦,刘恒,华国环. 一种系统级微机械振动陀螺的设计与仿真[J]. 电子测量技术, 2022, 45(16): 21-26.
- [8] ZHOU X, WU Y, WU X, et al. A novel ring vibrating gyroscope based on side piezo-electrodes[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(3): 555-561.
- [9] 张仟雨,杨文博,吴亚丽. 惯性导航系统中信息处理的特点研究[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 34-42.
- [10] 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.
- [11] 寇志伟,曹慧亮,刘俊,等. MEMS 环形振动陀螺结构设计及仿真分析[J]. 微纳电子技术, 2017, 54(7): 479-484.
- [12] 王勇军,李智,李翔. 无人机磁惯导系统中陀螺仪的叉积标定算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 14-23.
- [13] 李正阳,王烁,蔡文硕. 一种位标器陀螺跟踪系统的快速起旋控制设计[J]. 电子测量技术, 2022, 45(14): 43-49.

作者简介

寇志伟,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为微机电系统与传感器技术、计算机测控技术、电工理论与新技术。
E-mail: kouzhiwei@imut.edu.cn