

微机械陀螺振动特性的等效电学模拟¹

车录锋 熊斌 黄小振 王跃林

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所 传感技术国家重点实验室 上海 200050)

摘要 根据微机械陀螺的动力学方程建立其振动特性的等效电路模型, 该模型用电路模拟工具 PSPICE 实现. 利用这个电路模型, 可以分析陀螺的振动特性, 包括检测振动的瞬态响应和稳态响应, 检测振动对输入角速度的频率响应特性, 从而可以获得陀螺工作的优化条件; 并为传感器与接口电路的整体模拟打下基础.

关键词 微机械陀螺, 等效电路模型, 模拟

中图分类号 TP212.1

1 引言

微机械陀螺与传统陀螺相比, 具有体积小, 重量轻, 成本低, 可靠性高及可批量生产等优点, 可广泛应用于汽车的安全、导航, 摄像机的防抖动, 医疗仪器, 航空航天, 武器等领域, 具有广阔的应用前景. 对于电容式微机械陀螺, 检测电容的变化多在 10^{-18}F 量级, 这对陀螺信号检测电路提出了很高的要求. 陀螺的输出特性不仅与器件的结构设计有关, 而且与器件的检测模态频率调节^[1]和信号处理电路有关. 所以在陀螺接口电路的设计中, 传感器与接口电路的整体模拟有助于优化检测电路设计、提高陀螺检测性能. 这种方法在微机械加速度传感器的接口电路设计中已成功应用^[2,3]. 静电驱动电容检测的振动式微机械陀螺是一个复杂的机械系统, 本文从梳状振动式微机械陀螺^[4]的工作原理出发, 建立其等效的电路模型, 通过对振荡电路的模拟来分析陀螺的振动特性, 优化其工作条件.

2 微机械陀螺的等效电路模型

梳状振动式微机械陀螺结构如图 1 所示, 它利用静电梳状驱动激励振动, 用梳状差分电容实现信号检测, 可以检测垂直于器件平面的 z 轴方向角速度. 当微机械陀螺工作时质量块在驱动方向 (x 方向) 受静电力 $F_d = F_0 \sin \omega t$ 作用作简谐振动, 当在垂直于器件平面方向 (z 方向) 有角速度 Ω 输入时, 质量块将在检测方向 (y 方向) 受科里奥利力 F_c 作用作简谐振动, 检测出这一振动, 即可检测体系角速度 Ω 的大小. 陀螺的驱动方向和检测方向的动力学方程可以表示为

$$M_d \ddot{x}(t) + \lambda_d \dot{x}(t) + k_d x(t) = F_d \quad (1)$$

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

式中 M_d, M_s 为陀螺的驱动质量和检测质量; k_d, λ_d 为驱动模态的弹性系数和阻尼系数; k_s, λ_s 为检测模态的弹性系数和阻尼系数.

对 (1) 式求导, 并令 $v_x = dx/dt$, 可变为:

$$M_d \dot{v}_x(t) + \lambda_d v_x(t) + k_d x(t) = \dot{F}_d \quad (3)$$

采用静电梳齿双边推挽驱动时, 驱动力的大小为

$$F_d = A_d(V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$

其中 A_d 是与驱动结构有关的常数, V_1, V_2 是加载的驱动电压.

¹ 2001-07-29 收到, 2002-06-13 改回

国家 973 项目“集成微光机电系统”资助 (课题编号: G1999033101)

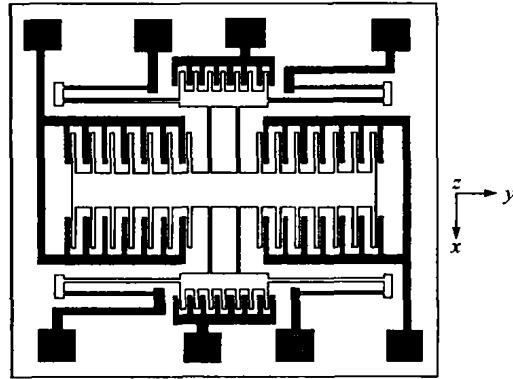


图1 梳状振动式微机械陀螺结构示意图

(3) 式可以由下面电路方程来等效:

$$C_d \ddot{V}_d + G_d \dot{V}_d + V_d/L_d = \dot{I}_{in} \quad (5)$$

根据(4)式 I_{in} 可以定义为

$$I_{in} = F_d = A_d(V_1^2 - V_2^2) \quad (6)$$

考虑到质量块在检测方向除受科里奥利力 F_c 之外, 还受到调节检测模态固有频率的静电力 F_e 的作用, (2) 式可以写为

$$M_s \ddot{y}(t) + \lambda_s \dot{y}(t) + k_s y(t) = F_s \quad (7)$$

检测质量块在检测方向受到的外力为

$$F_s = F_c + F_e = 2M_s \Omega v_x + A_s [1/(d_0 - y)^2 - 1/(d_0 + y)^2] V_D^2 \quad (8)$$

其中 d_0 是静态时检测电容的初始间距, A_s 是与检测结构相关的常数, y 是质量块在检测方向偏离平衡位置的位移, V_D 是检测差分电容组固定极板上加的直流偏压. (7) 式可以由下面电路方程来等效:

$$C_s \ddot{V}_s + G_s \dot{V}_s + V_s/L_s = V_{in}/L_s \quad (9)$$

由(8)式, 并根据 $v_x = V_d$ 和 $y = V_s$ 以及把输入角速度 Ω 等效成独立电压源 V_Ω , 可以把电压源 V_{in} 定义为

$$V_{in} = L_s \left[2M_s V_\Omega V_d + A_s \left(\frac{1}{(d_0 - V_s)^2} - \frac{1}{(d_0 + V_s)^2} \right) V_D^2 \right] \quad (10)$$

根据(5), (6), (9) 及(10)式建立了陀螺振动的等效电路模型, 如图2. 图2(a)为驱动的等效电路模型, 图2(b)为检测的等效电路模型. 在图中, G_1 是由驱动电压 V_1 和 V_2 控制的非线性压控电流源, 它产生等效陀螺静电驱动力的电流为 I_{in} ; E_1 是由等效成驱动振动速度的电压 V_d 和等效成输入角速度的电压 V_Ω 控制的非线性压控电压源, 它产生的电压与科里奥利力等效; E_2 是由等效检测振动振幅的电压 V_s 和调节模态匹配的静电压 V_D 控制的非线性压控电压源, 产生等效为调节检测模态固有频率静电力的电压; V_{in} 是 E_1 和 E_2 输出电压叠加, 等效检测方向所受外力的合力, 即 E_1 产生的科里奥利力和 E_2 产生的静电力的叠加.

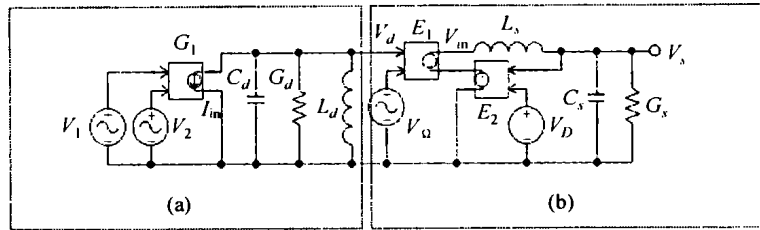


图 2 陀螺振动的等效电路模型

3 陀螺振动特性的模拟

根据图 2 建立的陀螺等效电路模型, 并结合如表 1 的陀螺结构参数^[5], 对陀螺的等效电路模型用 PSPICE 软件进行了模拟, 并分析了陀螺的性能和工作特点。

在模拟中, 设陀螺的驱动电压为 $V_1 = 20 + 10 \sin(2\pi f \cdot t)$ 和 $V_2 = 20 - 10 \sin(2\pi f \cdot t)$, f 是驱动的频率。

表 1 陀螺及其等效电学模型的参数

陀螺参数	等效电路模型参数
驱动质量 $M_d = 0.556 \times 10^{-6} \text{ kg}$	电容 $C_d = 0.556 \times 10^{-6} \text{ F}$
驱动模态阻尼力系数 $\lambda_s = 0.5 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$	电导 $G_d = 0.5 \times 10^{-4} \text{ S}$
驱动方向弹性系数 $k_d = 45.658 \text{ N/m}$	电感 $L_d = 0.0219 \text{ H}$
检测质量 $M_s = 0.485 \times 10^{-6} \text{ kg}$	电容 $C_s = 0.485 \times 10^{-6} \text{ F}$
检测模态阻尼力系数 $\lambda_s = 1 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$	电导 $G_s = 1 \times 10^{-4} \text{ S}$
检测方向弹性系数 $k_s = 44.405 \text{ N/m}$	电感 $L_s = 0.0225 \text{ H}$
驱动结构常数 $A_d = 1.416 \times 10^{-8} \text{ F/m}$	增益 $A_d = 1.416 \times 10^{-8}$
检测结构常数 $A_s = 1.02 \times 10^{-18} \text{ F} \cdot \text{m}$	增益 $A_s = 1.02 \times 10^{-18}$

3.1 检测模态固有频率的电压调节 由于驱动模态和检测模态的阻尼系数较小, 我们可以利用等效电路模型来分析驱动模态和检测模态的固有频率。可以加载不同电压 V_D 对检测模态的电路模型进行分析, 来调节检测模态的固有频率。图 3 所示为检测模态的固有频率与电压 V_D 的关系。由图中看到, 当 $V_D = 1.75 \text{ V}$ 时, 检测模态的固有频率等于驱动模态的固有频率。电压调整检测模态固有频率的范围很广, 当加载的电压 V_D 从 $0 \text{ V} \sim 5 \text{ V}$ 时, 检测模态的固有频率可以从 $1522 \text{ Hz} \sim 593 \text{ Hz}$ 之间连续调节。这为陀螺两个模态的匹配提供了重要的手段, 从而可以使陀螺具有较高的灵敏度和合适的带宽。

3.2 检测振动的模拟分析 当在敏感方向有角速度输入时, 可动质量块由于受科里奥利力的作用在检测方向振动。图 4 所示为检测振动在瞬态变化角速度输入下的瞬态响应, 输入角速度由 $0^\circ \sim 1^\circ/\text{s}$ 突变。可以看出, 检测振动需要 50 ms 左右的时间达到稳定, 这与检测模态的阻尼系数有关; 当检测振动稳定时, 是以驱动频率振动, 幅度与角速度的大小相关。

当输入角速度为正弦变化量, 设频率为 20 Hz , 幅度为 $1^\circ/\text{s}$ 时, 检测振动稳定时的波形如图 5 所示。图中的低频曲线是输入的角速度信号, 高频曲线是检测方向的振动位移曲线。我们可以看出检测振动是由两种抑制载波的双边带调制波合成的波形, 要从振动波形中获得图中低频角速度信号, 必须使用同步解调方法对高频波形进行振幅解调。

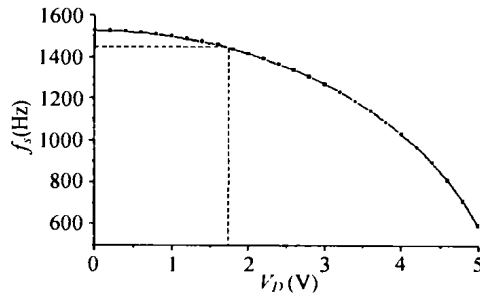


图 3 检测模式固有频率与调节电压关系

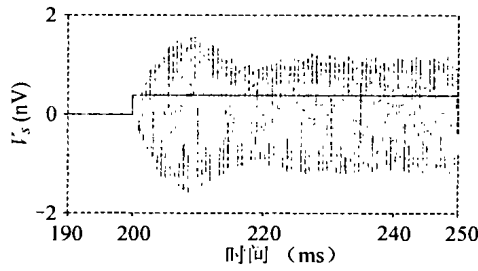


图 4 瞬态变化角速度输入时检测振动的瞬态响应

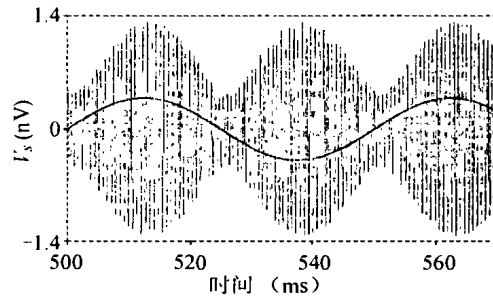


图 5 正弦变化角速度输入时检测模式的稳态振动波形

3.3 检测振动对输入角速度的频率响应特性 我们用检测振动的最大幅度对输入角速度频率的响应作为陀螺的频率响应特性，设输入角速度的幅度为 $1^\circ/s$ ，陀螺驱动频率等于驱动模式的固有频率，图 6 所示为在不同检测模式频率下，检测振动幅度的最大值随输入角速度频率 f_i 的关系，即陀螺的频率响应特性曲线。

由图 6，当 $V_D = 1.75V$ 时，驱动和检测模式的固有频率一致，这时低频输入角速度的灵敏度很大，但陀螺的工作带宽很窄，称为高灵敏度工作方式陀螺；当 $V_D = 3V$ 时，检测与驱动模式的固有频率相差较大，达到 $174Hz$ ，陀螺的工作带宽很宽，但灵敏度很低，称之为高带宽方式陀螺；当 $V_D = 1V$ ，这时检测模式的固有频率为 $1497 Hz$ ，灵敏度和工作带宽适中，所以我们可以根据应用需要选择 V_D 使陀螺工作在不同的方式中。

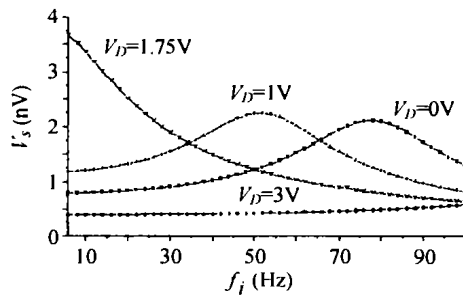


图 6 陀螺检测的频率响应曲线

4 结 论

通过建立静电驱动电容检测的振动式微机械陀螺的等效电路模型, 对其振动特性进行了模拟分析。分析了静电电压调节陀螺的检测模式的固有频率、检测振动的瞬态特性和稳态特性及检测振动对角速度的频率响应特性, 并得出陀螺工作的优化条件。该等效电路模型的建立为陀螺传感器模型与接口电路混合模拟提供了手段。

参 考 文 献

- [1] B. L. Lee, S. S. Baek, H. S. Kim, *et al.*, A tunable vibratory microgyroscope, *Sensors and Actuators A*, 1998, 64(1), 51-56.
- [2] T. Veijola, Accelerometer model in APLAC, Tech. Rep. CT-18, Helsinki University of Technology, Circuit Theory Laboratory, Feb. 1994.
- [3] T. Veijola, H. Kuisma, J. Lahdenpera, *et al.*, Equivalent circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer, *Sensors and Actuators A*, 1995, 48(3), 239-248.
- [4] 熊幸果, 微机械梳状电容式加速度传感器及梳状振动式陀螺研究, [博士论文], 上海, 中国科学院上海冶金研究所, 1999.
- [5] 黄小振, 电容式振动微机械陀螺接口电路的设计、模拟与测试, [硕士论文], 上海, 中国科学院上海冶金研究所, 2001.

EQUIVALENT ELECTRICAL SIMULATION OF MICROMACHINED GYROSCOPE'S OSCILLATING PROPERTIES

Che Lufeng Xiong Bin Huang Xiaozhen Wang Yuelin

(*State Key Lab. of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China*)

Abstract An equivalent circuit model of micromachined gyroscope's oscillating properties is derived according to its dynamics equation. The model is implemented with the circuit simulation tool PSPICE, and can be used to analyse oscillating properties, including the detection mode transient response, stable response and frequency response to angular rate. Thus the optimizing conditions can be gotten. And also the model enables the sensor to simulate together with the interfacing electronics.

Key words Micromachined gyroscope, Equivalent circuit model, Simulation

车录锋: 男, 1971年生, 博士, 副研究员, 研究方向: 自动化检测与控制, 微传感器与微系统。

熊 斌: 男, 1962年生, 博士, 研究员, 研究方向: MEMS 及其相关技术。

黄小振: 男, 1975年生, 硕士, 研究方向: 电路的设计与模拟。

王跃林: 男, 1959年生, 博士, 教授, 973项目“集成微光机电系统”首席科学家, 研究方向: 微光机电系统。