

新型低噪声微机械陀螺闭环驱动电路

孙明¹, 谭晓昀¹, 李子芃¹, 刘晓为^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 150001 哈尔滨, fuxinmingming@126.com;

2. 微系统与微结构制造教育部重点实验室, 150001 哈尔滨)

摘要: 为将陀螺结构引入到闭环驱动电路的仿真系统中, 建立了与微机械陀螺结构等价的电学模型. 微机械陀螺闭环驱动电路基于电荷泵锁相环技术, 用低噪声跨阻放大器代替传统的电荷放大器实现 I-V 转换, 有效避免了电荷放大器在实现 I-V 转换时所产生的随陀螺固有频率变化而变化的相位误差. 用基于 CCCII+ 技术的有源电阻代替无源电阻, 大大降低了电路的噪声, 并且提高了电路的集成度. 仿真结果表明, 微机械陀螺结构的固有频率为 2.7 kHz, 陀螺结构在驱动方向位移的相位滞后于驱动方向驱动力相位 90°; 在 50 μ A 的偏置电流下, 有源电阻阻值为 250 k Ω , 在工作频率下的噪声为 0.037 fV²/Hz, 大大低于无源电阻的噪声. 闭环接口电路实现了在陀螺固有频率下的自激振荡.

关键词: 闭环驱动电路; 微机械陀螺; CCCII+

中图分类号: TN432

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)09-0038-04

New low noise closed-loop driving circuit for the micro-gyroscope

SUN Ming¹, TAN Xiao-yun¹, LI Zi-peng¹, LIU Xiao-wei^{1,2}

(1. MEMS Centre, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, fuxinmingming@126.com;

2. Key Laboratory of Micro-Systems and Micro-Structures Manufacturing, Ministry of Education, 150001 Harbin, China)

Abstract: To bring the fabric of the micro-gyroscope into simulation of total closed-loop system, the equivalent electrical analogue of drive part of the micro-gyroscope is built. The new low noise closed-loop driving circuit is based on the phase-locked technology using the transimpedance amplifier to realize I-V transformation which effectively avoids phase error caused by the charge amplifier. By using the CCCII+ technology to realize the floating resistor, the noise of the total closed-loop driving circuit is reduced. In simulation, the natural frequency of the micro-gyroscope is 2.7 kHz. The displacement in the drive direction of the micro-gyroscope has 90° phase lag comparing to the driving force in the drive direction. The value of floating resistor is 250 k Ω where the bias current is 50 μ A. The active resistor is 0.037 fV²/Hz. The micro-gyroscope is vibrated at its natural frequency.

Key words: closed-loop; micro-gyroscope; CCCII+

微机械陀螺接口电路最初采用开环系统, 开环系统的设计难度低, 但是具有其自身固有的缺陷^[1]. 开环系统需要预先输入驱动交流信号, 并且要保证输入的驱动交流信号与陀螺结构自身固有频率相等, 才能得到最大的频率响应. 但是, 由于外界温度、湿度等环境条件的影响, 微机械陀螺

结构的固有频率会发生变化, 使外界输入的交流驱动信号的频率不能跟随陀螺固有频率, 造成输出响应不稳定. 为此, 微机械陀螺都采用闭环的接口电路方式. 闭环接口电路中交流驱动信号由电路自身产生, 不需要外加交流驱动信号, 驱动信号能够跟踪陀螺的固有频率的变化, 保证了系统的频率稳定性和幅值稳定性. 然而, 陀螺闭环接口电路存在如何使陀螺结构能够在其固有频率下起振的设计难点.

本文中提出了一种基于锁相技术的微机械陀螺

收稿日期: 2010-03-18.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2008AA042201).

作者简介: 孙明(1985—), 男, 硕士研究生;

刘晓为(1955—), 男, 教授, 博士生导师.

闭环驱动电路,设计了一种高增益低噪声的电阻放大器来实现陀螺闭环接口电路前端的I-V转换.

1 基于锁相技术的微机械陀螺闭环驱动电路

微机械陀螺结构在驱动方向位移的相位滞后于陀螺结构驱动力相位 90°. 其结构为电容式全对称陀螺仪结构^[1-4],陀螺驱动梳齿之间的工作类似于许多对可变电容的平行板电容器,陀螺结构驱动方向敏感电流的相位滞后于陀螺结构驱动方向位移相位 90°,使陀螺驱动方向的敏感电流与陀螺结构在驱动方向的驱动力同相.

为了完成微机械陀螺结构的闭环自激振荡,只要在微机械陀螺闭环驱动电路中保证微机械陀螺结构输出的敏感电流与经过闭环驱动电路处理后最终得到的驱动电压同相即可. 基于锁相原理的微机械陀螺闭环驱动电路的结构如图 1.

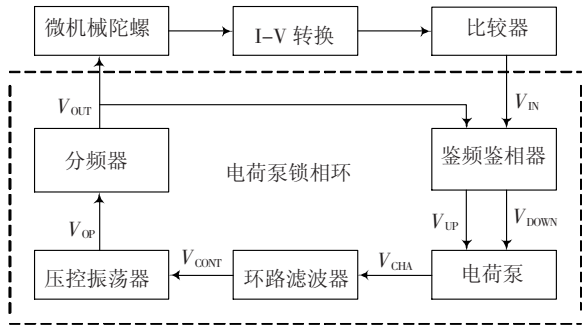


图 1 基于锁相原理的微机械陀螺闭环驱动电路

陀螺接口电路前端由跨阻放大器将微机械陀螺结构输出的敏感电流转换为可被陀螺接口电路处理的电压量,并实现相当大的电压增益. 微机械陀螺结构输出的敏感电流一般在 nA 量级. 后级的比较器将跨阻放大器输出的电压信号与一个固定的直流电压相比较,得到一个与跨阻放大器输出信号同相的方波信号,这个方波信号与陀螺结构敏感电流也是同相的. 比较器的输出为电荷泵锁相环的输入 V_{IN} ,电荷泵锁相环对输入信号 V_{IN} 锁相,得到一个与输入 V_{IN} 同相的电压量 V_{OUT} .

电荷泵锁相环主要由鉴频鉴相器、电荷泵、环路滤波器、压控振荡器、分频器组成. 其能够锁定输入信号 V_{IN} 与输出信号 V_{OUT} 的相位,保证两者的相位是完全相同的,从而保证整个闭环陀螺接口电路的相移为零,即微机械陀螺结构驱动方向的敏感电流与闭环驱动电路输出的微机械陀螺结构的驱动电压同相. 图 1 中的虚线部分为电荷泵锁相环,其中的鉴频鉴相器检测电荷泵锁相环输入 V_{IN} 与输出 V_{OUT} 之间的相位差和频率差产生相应

的控制信号 V_{UP} 和 V_{DOWN} . 这两个电压信号作为后级的电荷泵的控制输入信号,电荷泵将两个误差信号 V_{UP} 和 V_{DOWN} 进行处理得到输出信号 V_{CHA} ,输出信号 V_{CHA} 在经过环路滤波器后得到一个直流电压信号 V_{CONT} , V_{CONT} 作为压控振荡器的控制信号,控制压控振荡器的工作. 由于压控振荡器的输出信号 V_{OP} 的频率较高,需要引入分频器来对其进行分频,得到一个与微机械陀螺结构的固有频率在同一量级的压控振荡信号. 分频器的输出就作为整个闭环微机械陀螺结构接口电路的输出信号反馈给陀螺结构,驱动陀螺结构在其固有频率下做自激振荡. 当锁相环处于锁定状态时, V_{CONT} 为一恒定的电压值,电荷泵锁相环的输入信号 V_{IN} 与输出信号 V_{OUT} 同相,整个陀螺结构工作在自激振荡状态.

目前,已能够实现电荷泵锁相环 V_{IN} 与 V_{OUT} 同相,但需要保证前级的 I-V 转换模块没有相移. 传统的电荷放大器虽然能够实现 I-V 转换,并且实现极大的增益,但存在缺陷(如图 2).

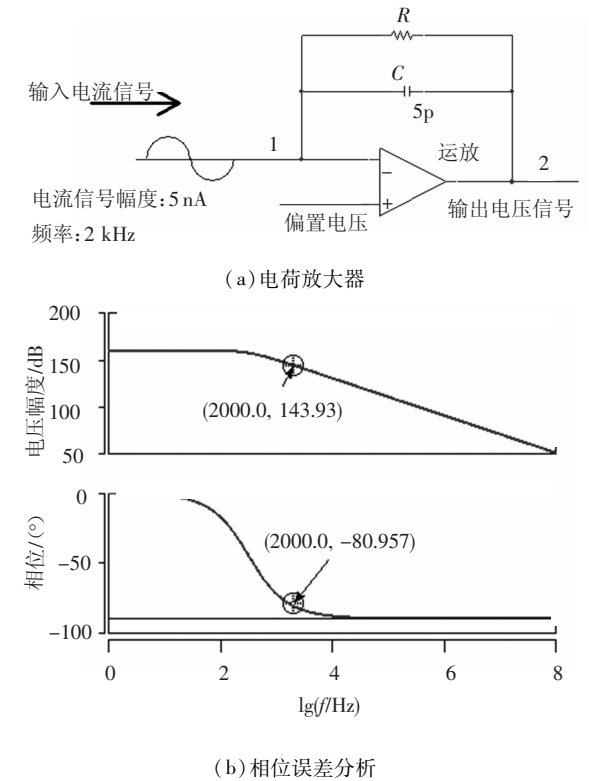


图 2 电荷放大器及其相位误差仿真分析

电荷放大器在实现 I-V 转换时存在相位误差,这是由于反馈电阻 R 引入造成的. 为了对电荷放大器的反向输入端进行偏置,必须加入一个大的反馈电阻 R ,但导致电荷放大器在进行 I-V 转换时出现了相移误差(图 2 (b)),并且这个相移误差随着陀螺固有频率变化而变化,在 2 kHz 下时,这个相位误差约为 10°.

2 低噪声跨阻放大器的设计

跨阻放大器的结构示意图如图 3, 由于其只包含一个反馈电阻 R 来实现 $I-V$ 转换, 故没有相移误差. 陀螺结构驱动方向的敏感电流流量级典型值为 nA 级, 为了得到能被后级比较器处理的电压值, 前级跨阻放大器要实现非常大的增益; 而跨阻放大器的增益就是其反馈电阻的大小, 故而跨阻放大器反馈电阻 R 就必须做得很大.

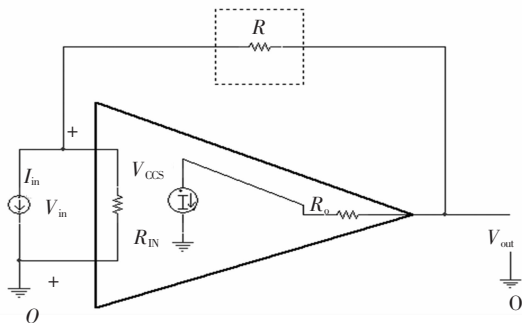


图 3 跨阻放大器结构示意图^[5]

传统方法用 N 阱电阻或者多晶硅电阻等方法来做电阻, 这种方法实现的电阻都属于无源电阻. 无源电阻容易实现, 但存在如下缺陷: 第一, 无源电阻实现几百 $k\Omega$ 的大电阻会占用极大的芯片面积, 给集成化和芯片成本的降低带来了极大的难度; 第二, 无源电阻实现电阻一般会有 20% 的误差; 第三, 无源电阻阻值越大, 其产生的噪声越大, 因为无源电阻产生的噪声为热噪声, 其值与无源电阻的阻值成正比^[6].

基于上面的分析, 采用 CCCII+ 的电流模技术来实现一个大阻值的有源电阻. 其实现有源电阻的结构示意图如图 4 所示.

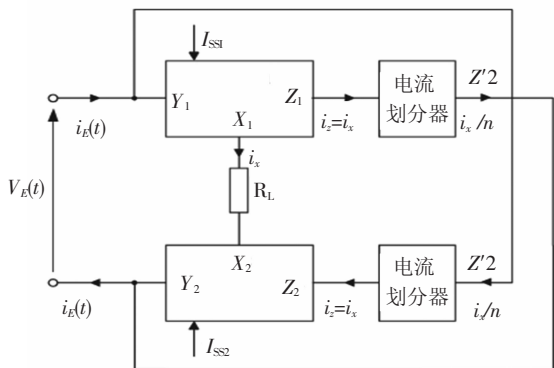


图 4 基于 CCCII+ 技术的有源电阻结构示意图

图 4 中, 在理想情况下, 节点 Y 和节点 Z 的输入电阻无穷大, 这两个节点的输入电流为零. 从节点 Y 到节点 X , 其工作类似于一个电压跟随器^[7-10], 即节点 X 电压跟随节点 Y 电压的变化. 同时, 当从节点 X 向节点 Z 看去时, 其工作类似于一个电流镜, 即 $i(Z) = i(X)$. 基于以上分析, 可以

计算图 4 有源电阻的阻值为

$$R_E(t) = \frac{V_E}{i_E(t)} = \frac{V(Y_1) - V(Y_2)}{i_X/n} = \frac{V(X_1) - V(X_2)}{i_X/n} = nR_L. \quad (1)$$

从式(1)可以看到, 只要将可调参数 n 做得很大, 就可以得到一个大的有源电阻. 该有源电阻具体实现的 MOS 管级电路如图 5 所示.

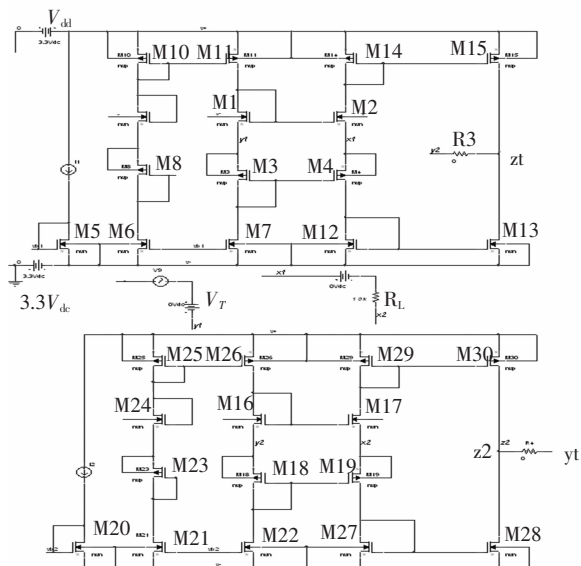


图 5 有源电阻的 MOS 管级电路结构

图 6 为跨阻放大器实现的具体 MOS 管电路, 跨阻放大器的跨阻采用有源电阻来实现, 跨阻放大器自身是一个具有高增益的放大器, 采用电流偏置的方法, 右侧为一个二级放大器, 左侧部分为放大器的偏置、startup 电路和 bias 电路, 为了提高放大器的增益, 输出级采用了 cascode 的形式.

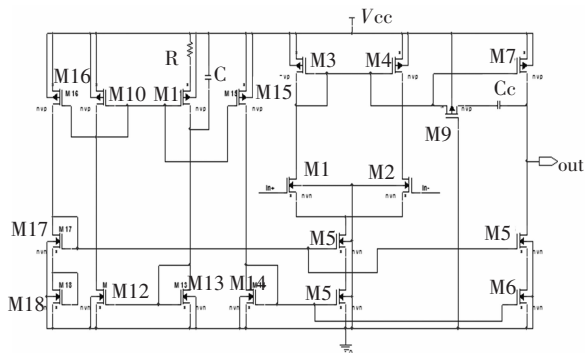
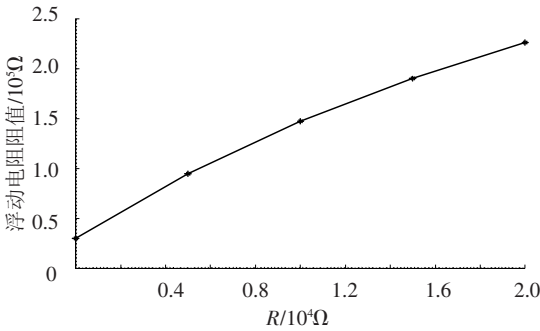


图 6 跨阻放大器结构示意图

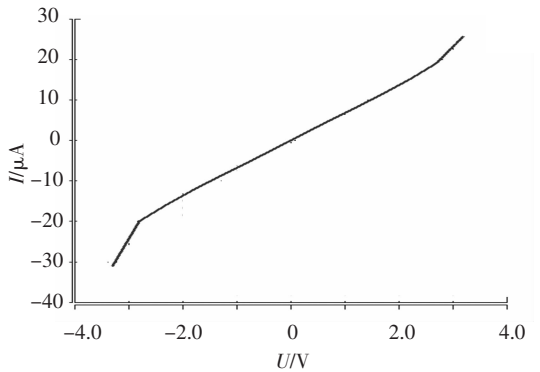
3 电路仿真结果分析

采用 Hspice 软件仿真微机械陀螺闭环接口电路. 对于电阻放大器, 有源电阻采用 CCCII+ 的电流模技术来实现. 其供电电压为 $\pm 3.3V$, 偏置电流为 $50\mu A$, 该有源电阻的阻值受控于电阻 R_L , 如图 7(a) 所示. 由图 7(b) 发现该有源电阻几乎在整个电源电压范围内保持线性, 基本上可以保

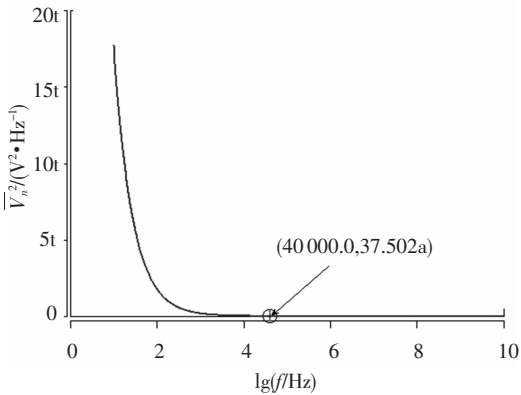
证该阻值在 rail - to - rail 范围内是恒定不变的。



(a) 有源电阻阻值与受控电阻 R_L 之间的关系



(b) 有源电阻两端电压与流过其电流的关系



(c) 有源电阻的噪声分析

图7 有源电阻仿真结果分析

仿真发现,得到了一个阻值为 $250\text{ k}\Omega$ 的有源电阻,由于电路中引入了高频载波,在该频率下所设计的有源电阻的噪声为 $37.502\text{ aV}^2/\text{Hz} = 0.037\text{ fV}^2/\text{Hz}$ 。同样阻值的无缘电阻的热噪声为:

$$\overline{V_n^2} = 4kTR = 4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 250k \approx 4.14\text{ fV}^2/\text{Hz}.$$

由式(2)可知,无源电阻的热噪声远大于所设计的有源电阻的噪声.故而有源电阻极大地降低了电路的噪声,并且实现了没有相移的 $I - V$ 转换。

4 结 论

1)为了将微机械陀螺结构引入到整体电路的仿真中,建立了与其等价的电学模型。

2)仿真发现,微机械陀螺结构的固有频率约为 2.7 kHz ,并且其在驱动方向位移的相位滞后于驱动力的相位 90° 。

3)基于电荷泵锁相环技术的陀螺闭环接口电路用跨阻放大器代替电荷放大器实现 $I - V$ 转换,有效避免了由电荷放大器所产生的随陀螺固有频率频率变化的相移误差。

4)采用 CCCII + 的电流模技术实现有源电阻代替无源电阻,大大降低了电路的噪声,整个陀螺接口电路在陀螺固有频率下实现了自激振荡。

参考文献:

[1] JONG-SEOK K, SANG-WOO L, KYU-Dong J, *et al.* Quality factor measurement of micro gyroscope structure according to vacuum level and desired Q-factor range package method [J]. Microelectronics Reliability, 2008, 48(6):948-952.

[2] 黄小振. 电容式振动陀螺及接口电路[D]. 上海:中国科学院上海冶金研究所, 2001:50-70.

[3] SAUKOSKI M, ALTONEN L, SALO T, *et al.* Interface and control electronics for a bulk micro-machined capacitive gyroscope [J]. IEEE Journal of Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147:183-193.

[4] MO Bing, LIU Xiaowei, DING Xuewei, *et al.* A novel closed-loop drive circuit for the micro-machined gyroscope [C]//Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA 2007). Harbin, China: [s. n.], 2007: 3384-3389.

[5] SANSEN W M C. Analog design essentials [M]. [S. l.]: Springer, 2008:110-134.

[6] FABRE A, ZOUAOUI ABOUDA H. On the frequency compensation of some electronic functions using translinear conveyors [C]// Proc ELECO. Bursa, Turkey: [s. n.], 1999:7-19.

[7] BRUUN E. CMOS current conveyors [J]. Circuits and Systems Tutorials, 1996, 11(5): 632-640.

[8] SAKURAI S. A CMOS square-law programmable floating resistor independent of the threshold voltage [J]. IEEE Transactions on circuits and systems, 1992, 39(8): 45-50.

[9] WANG Yi, A controllable resistor and its applications in pole-zero tracking frequency compensation methods for LDOs [J]. Journal of Semiconductors, 2009, 30(9): 32-37.

[10] SINGH S P. A new floating resistor for CMOS technology [J]. IEEE Transactions on circuits and systems, 1989, 36(9):110-114.

(编辑 杨波)