

The Research on the Dual Closed-Loop Driving Circuits for Micro-Machined Gyroscope

TAN Xiaoyun^{*}, LEI Longgang, WANG Guanshi

(MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to improvement the detection sensitivity for micro-machined gyroscope, Studying on the driving circuits of the micro-machined gyroscope the dual closed-loop driving scheme for micro-machined gyroscope is proposed, based on the analysis of the phase theory and amplitude theory, and the scheme is verified by using Simulink model. The related circuits have also been implemented. Considering the characteristics of Phase-Locked Loop (PLL), PLL is applied to adjust the frequency of driving signal in accordance with the resonant frequency in the driving mode; the amplitude control includes peak detector, DC comparator and Variable Gain Amplifier (VGA) to achieve the constant amplitude. The simulation results show that, setting time of stable oscillation is at 45 ms and the stable oscillation frequency is 2.755 3 kHz. The frequency difference between driving frequency and resonant frequency is only 0.1 Hz. Frequency jitter is 0.056 563 Hz. Compared with the traditional closed-loop driving circuits, setting time of the dual closed-loop driving circuits shorten 30.77%. The frequency jitter is 32.72% of the AGC closed-loop driving circuits for micro-machined gyroscope, the dual closed-loop driving circuits for micro-machined gyroscope improved the quality of the driving signal. So it is significative for the improvement of the detection sensitivity for micro-machined gyroscope.

Key words: dual closed-loop driving; micro-machined gyroscope; PLL; VGA; simulink

EEACC: 7630; 1250

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2010.10.018

电容式微机械陀螺双环路闭环驱动电路研究

谭晓昀^{*}, 雷龙刚, 王冠石

(哈尔滨工业大学 MEMS 中心, 哈尔滨 150001)

摘要: 为了提高微机械陀螺系统的检测灵敏度, 对微机械陀螺系统的驱动电路进行了研究。分析了微陀螺闭环驱动系统理论, 基于此提出一种双环路闭环驱动方法, 并且利用数学工具 simulink 建立系统模型, 验证此方法的可行性, 最后设计完成相应电路。此方法引入锁相环实现闭环驱动电路的稳频控制; 采用自动增益控制器 (AGC) 实现恒幅控制。利用 Hspice 完成电路级仿真。结果表明, 微机械陀螺双环路闭环驱动电路建立稳定振荡的时间为 45 ms, 稳定振荡频率为 2.755 3 KHz, 频率偏差为 0.1 z, 频率抖动为 0.056 563 Hz。相对于传统的 AGC 闭环驱动电路, 此闭环驱动电路建立稳定振荡时间缩短了 30.77%, 频率稳定性是传统 AGC 闭环驱动电路的 32.72%。微机械陀螺环路闭环驱动电路提高驱动信号性能, 对于微机械陀螺检测灵敏度的提高有着重要意义。

关键词: 双环路闭环驱动; 微机械陀螺; 锁相环; 可变增益放大器; simulink

中图分类号: TP212

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)10-1449-05

陀螺是用于测量物体旋转速率的传感器^[1]。电容式硅微机械陀螺具有体积小、可靠性高、成本低、可批量生产等优点, 在工业、航空航天、消费电子、汽车领域得到广泛应用, 是目前研究的热点^[2-4]。好的微机械陀螺系统不但要有好的结构, 还要有好的接口电路, 闭环驱动作为微机械陀螺接口电路的一部分, 是当前微机械陀螺主要的驱动方式, 也是研究的热点。设计出性能优良的闭环驱动

电路对微机械陀螺的可靠性和检测灵敏度提高起着关键作用。目前, 闭环驱动电路主要是采用单环路 (自动增益控制技术) 实现闭环驱动^[5-7]。这种驱动技术是直接放大微机械陀螺驱动方向的敏感电流, 再采用自动增益控制器实现幅度控制, 从而达到微机械陀螺稳定振动。这种闭环驱动电路不但稳定振动时间长, 频率稳定性差, 而且频率误差和振动幅度相互影响, 影响微机械陀螺检测性能。因此, 本文

在对微机械陀螺闭环驱动系统理论分析的基础上,提出一种双环路闭环驱动方案,以达到提高微机械陀螺检测性能的目的。

1 微机械陀螺闭环驱动理论分析

电容式硅微机械陀螺结构如图1所示。 X 轴为驱动方向, Y 轴为检测方向, Z 轴为角速度输入方向。微陀螺基于科氏效应检测角速度。

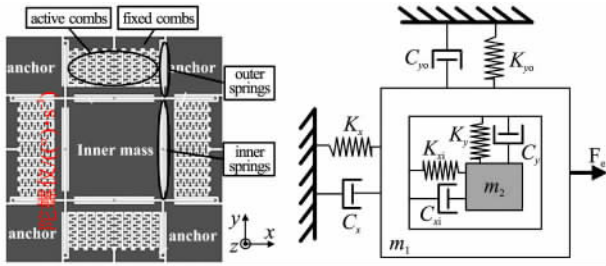


图1 电容式微机械陀螺结构和动力学模型示意图

微陀螺闭环驱动电路实时跟踪微陀螺谐振频率的变化,保持微陀螺高性能。为了实现自激振荡,闭环驱动系统必须满足相位和幅度条件。

1.1 相位理论分析

若质量块在 X 方向(驱动方向)受到周期性作用力 $F_{tot} = F_o \sin \omega t$ 的作用时,其在 X 方向的动力学方程可以表示为:

$$M_d \ddot{x} + \lambda_d \dot{x} + K_d x = F_{tot} \quad (1)$$

定义 $\omega_d = \sqrt{K_d/M_d}$ 表示驱动模式的固有频率; $\xi_d = \lambda_d/2M_d\omega_d$ 表示驱动模式的阻尼比; $Q_d = 1/2\xi_d = M_d\omega_d/\lambda_d$ 表示微机械陀螺驱动方向的品质因子。

求解方程(1),只考虑稳态项,得:

$$x(t) = A_d \sin(\omega t + \varphi_d) \quad (2)$$

式(2)中,总质量块在驱动方向的振动幅度 A_d 为:

$$A_d = \frac{F_o}{M_d \omega_d^2 \sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_d^2}\right)^2 + \left(\frac{\omega}{Q_d \omega_d}\right)^2}} \quad (3)$$

相移 φ_d 为:

$$\varphi_d = \arctan \frac{-2\xi_d \omega_d \omega}{\omega_d^2 - \omega^2} \quad (4)$$

微陀螺品质因数 Q_d 值远大于100,即 $\omega \ll Q_d \omega_d$ 。简化方程(3)得到:

$$A_d = \frac{F_o}{M_d \omega_d \sqrt{\Delta \omega (\omega_d + \omega)}} \quad (5)$$

如图2所示,设驱动固定梳齿和活动梳齿电压差为 V_d ,则其敏感电流大小为:

$$i_{\text{sense}} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dC \cdot V_d}{dt} = C \cdot \frac{dV_d}{dt} + V_d \cdot \frac{dC}{dt} \quad (6)$$

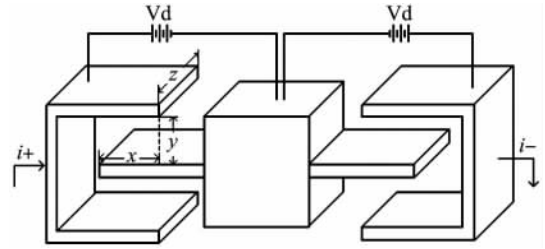


图2 微陀螺驱动敏感电极

由于 V_d 是驱动活动梳齿和驱动固定梳齿之间的直流电压差,所以其对时间求导为零。

$$i_{\text{sense}} = V_d \cdot \frac{dC}{dt} = \varepsilon_o \frac{z}{y} V_d \cdot \frac{dx}{dt} = \varepsilon_o \frac{z}{y} V_d \cdot A_d \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \varphi_d + 90^\circ) \quad (7)$$

上面分析得出以下结论:

①如果 $\omega = \omega_d$,驱动电压和驱动敏感电流间相移为0。

②振动幅度 A_d 是关于 $\Delta \omega$ 的函数。要实现最大幅度振荡,必须使频率偏差最小。

1.2 幅度理论分析

图5为微陀螺闭环驱动幅度控制原理图。AGC由整形器、低通滤波器、DC比较器和VGA组成。环路方程为:

$$\ddot{x}(t) + 2\omega_d \xi_d \dot{x}(t) + \omega_d^2 x(t) = \frac{1}{M_d} K (V_{\text{ref}} - A(t)) \dot{x}(t)$$

$$A(t) = \frac{1}{t} (|R_1 \cdot \dot{x}(t)| - A(t))$$

$$K = R_1 \cdot K_{\text{VGA}} \cdot K_1 \quad (8)$$

方程(8)是非线性方程。可以用周期平均法简化方程^[8]。如方程(2),如果 $\omega \neq \omega_d$, A_d 和 φ_d 是缓变函数,对式(2)微分得:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= \dot{A}_d \sin(\omega t + \varphi_d) + A_d \omega \cos(\omega t + \varphi_d) + \\ &A_d \dot{\varphi}_d \cos(\omega t + \varphi_d) - \dot{A}_d \sin(\omega t + \varphi_d) + \\ &A_d \dot{\varphi}_d \cos(\omega t + \varphi_d) = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) &= \ddot{A}_d \cos(\omega t + \varphi_d) - \ddot{A}_d \omega^2 \sin(\omega t + \varphi_d) - \\ &A_d \omega \dot{\varphi}_d \sin(\omega t + \varphi_d) \end{aligned} \quad (10)$$

从文献[9]我们可以得到自激振荡起振条件:

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_d}{Q_d} - \frac{KV_{\text{ref}}}{M_d} \right) \geq 0 \quad (11)$$

只要满足方程(11),闭环控制系统就能起振。重复多次振荡后,闭环控制系统实现稳幅振荡。

2 微陀螺等效电学特性

设 $v(t) = \frac{dx}{dt}$,方程(1)可表示为:

$$\ddot{v}(t) + 2\omega_d \xi_d \dot{v}(t) + \omega_d^2 v(t) = \frac{F_{tot}}{M_d} \quad (12)$$

根据方程(12)特点,可知如图3所示的RLC电路模型可作为微陀螺驱动模态等效电学模型。其参数对应关系如表1所示。

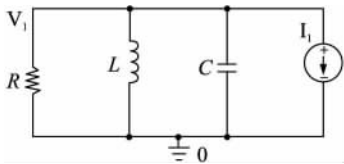


图3 微陀螺驱动模态等效电路模型

表1 微陀螺驱动模态等效电路模型对应关系

动力学模型参数	电学模型参数
质量 M_d	电容 C
阻尼力系数 λ_d	电阻的倒数 $1/R$
弹性系数 K_d	电感的倒数 $1/L$
驱动力 F_{tot}	电流源 I_1
X 方向振动速度 v_x	电压 V_1

代入微陀螺参数对其进行小信号分析得到图4的仿真结果。

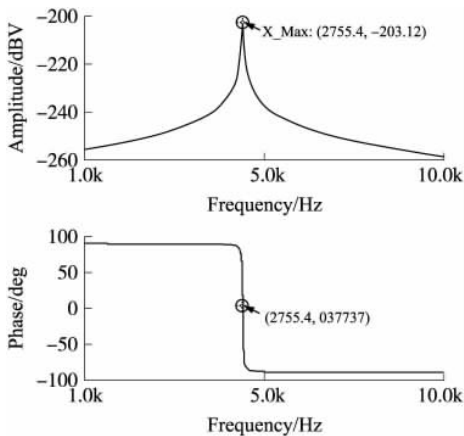


图4 微陀螺等效电学模型交流小信号分析结果

图4显示微陀螺等效电学模型呈现窄带通特性。当外界噪声经过此模型时,其它频率信号幅度极大地衰减。微陀螺谐振频率为2.7554 kHz。另外,驱动信号与驱动敏感输出信号相移为0。与上文理论分析相符。

3 双环路闭环驱动电路实现

基于上面分析,微陀螺双环路闭环驱动系统如图5所示。从带通滤波器的角度看,电荷泵锁相环相当于一个中心频率可跟踪目标信号频率的窄带带通滤波器,它能限制噪声和外界干扰。因此,锁相环能产生稳定的驱动信号。

利用AGC实现闭环系统的幅度控制。如果振荡幅度小于参考值,则输出电压值增大。反之,减小。直到输出敏感电压值等于参考值,实现稳幅振荡。

在此双环路闭环驱动系统中,电荷泵锁相环

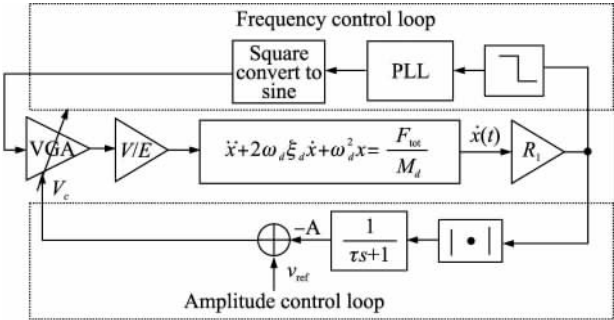


图5 微机械陀螺双环路闭环驱动系统原理图

(CP-PLL, Charge-Pump Phase-Locked Loop)本质上是一个相位负反馈的自动控制系统,因此具有频率跟踪功能^[10]。当锁相环进入锁定状态时,输入信号与反馈信号相位差为常数。因此,频率控制通路和幅度控制通路实现闭环驱动系统恒幅稳定振荡。

图6所示为双环路闭环驱动系统Simulink模型图。图7为其仿真结果,结果表明此闭环驱动系统能实现稳幅振荡。

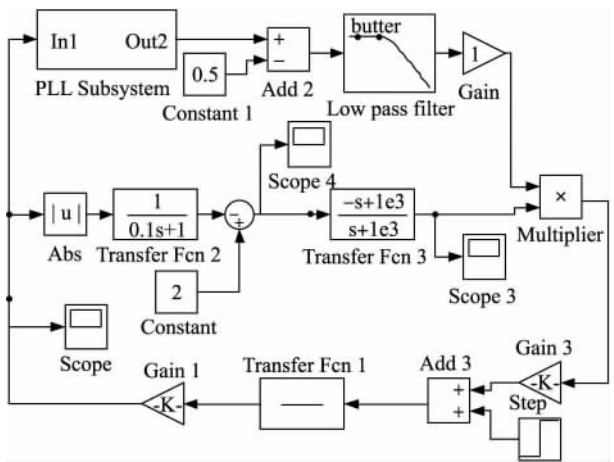


图6 微陀螺双环路闭环驱动系统 Simulink 模型

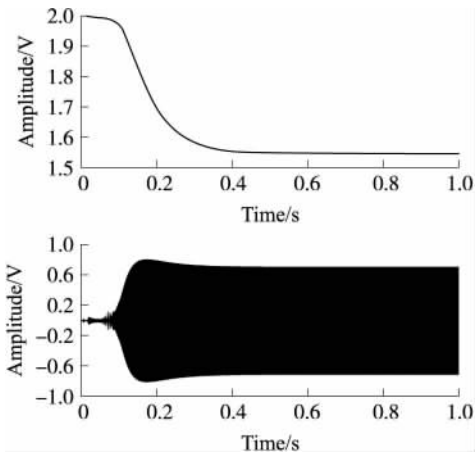


图7 微陀螺双环路闭环驱动系统 Simulink 模型仿真结果

3.1 电荷泵锁相环电路实现

锁相环由鉴频鉴相器、电荷泵、低通滤波器、压

控振荡器和分频器组成。压控振荡器是锁相环的关键模块。图 8 所示为压控振荡器原理图,它是四级全差分环形振荡器。

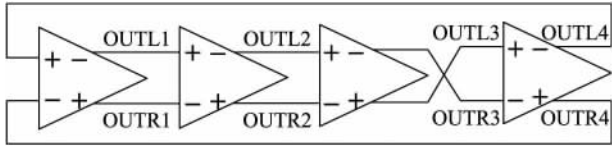


图 8 四阶全差分环形振荡器

每级延迟单元如图 9 所示。 $M1$ 和 $M2$ 为全差分输入级。补偿管 $M5$ 和 $M8$ 一直处于饱和状态,用于提高延迟单元增益。 $M3$ 和 $M4$ 管引入正反馈以维持振荡。压控振荡器的输出频率根据控制电压 V_c 变化而变化。

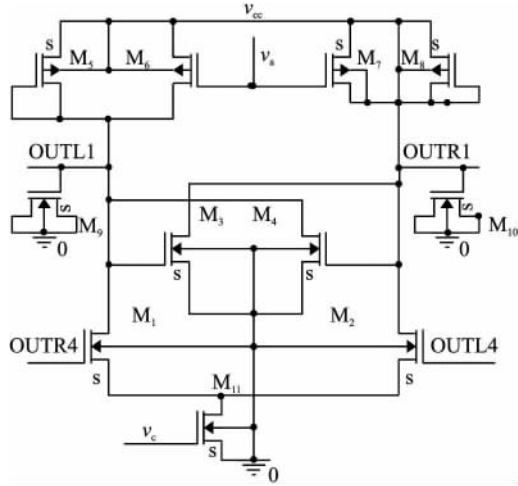


图 9 压控振荡器延迟单元 CMOS 电路原理图

3.2 AGC 电路实现

在闭环控制系统中,自动增益控制器(AGC)根据输入信号值自动控制它的增益实现稳幅振荡。可变增益放大器(VGA)是 AGC 的主要部分。VGA 电路原理图如图 10 所示。它由控制电路级和可变增益放大级两部分组成。 M_3 和 M_4 为电流源提供偏置电流。 $M_5 \sim M_8$ 为共源共栅电流镜,镜像电流到下级控制下级电路增益。可变增益放大器是基于吉尔伯特单元实现的。

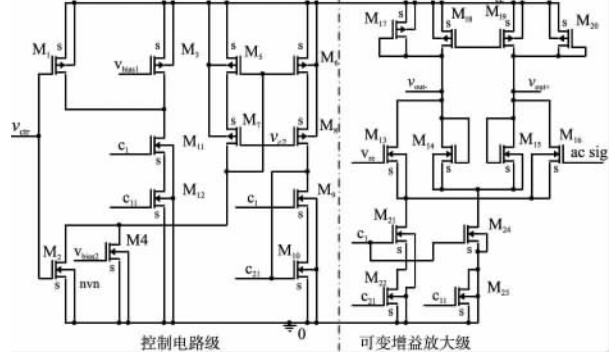


图 10 可变增益放大器 CMOS 电路原理图

4 仿真与分析

利用 Hspice 完成微陀螺闭环控制系统仿真。直流电压为 $5 V_{dc}$,驱动交流信号幅值通过幅度控制通路设置实现。仿真结果见图 11。仿真结果表明,稳定振荡建立时间为 $45 ms$ 。当处于稳定振荡时,输出敏感电压为常数。

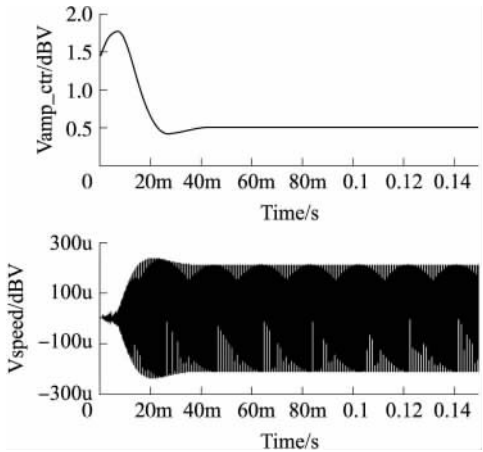


图 11 双环路闭环驱动系统仿真结果

双环路闭环控制电路仿真特性如图 12 所示:其稳定振荡频率抖动为 $0.056 563 Hz$ 。稳定振荡平均频率为 $2.755 3 kHz$ 。频率偏差为 $\Delta\omega = 2.755 4 kHz - 2.755 3 kHz = 0.1 Hz$ 。

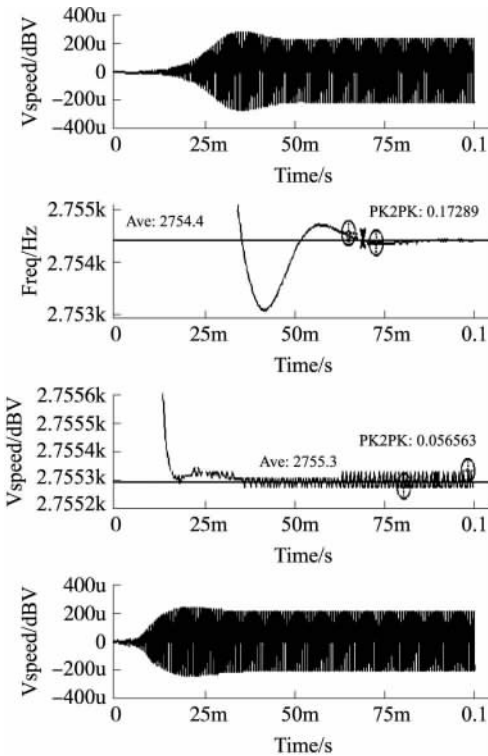


图 12 双环路闭环驱动电路和 AGC 闭环驱动电路仿真特性对比图

AGC 闭环驱动电路仿真特性显示: 稳定振荡建立时间为 65 ms, 稳定振荡频率抖动为 0.172 89 Hz。稳定振荡平均频率为 2.754 4 Hz。

5 结论

考虑到锁相环特性,在对硅微机械陀螺的驱动模态进行相位和幅度理论分析基础上,本文提出双环路闭环驱动方案,并完成闭环驱动电路设计。利用 Hspice 进行仿真。相对于 AGC 闭环驱动电路,双环路闭环驱动电路有三个优点:

a、双环路闭环驱动电路系统稳定振荡建立时间缩短了 30.77%。

b、双环路闭环驱动电路稳定振荡频率抖动性是 AGC 闭环驱动电路的 32.72%。

c、双环路闭环驱动电路实现振荡幅度和频率误差的解耦,使两者不相互影响。

基于以上结论,微陀螺双环路闭环驱动电路对于微陀螺检测灵敏度和检测精度的提高有着重要的意义。

参考文献:

- [1] Mikko Saukoski, LASSE Aaltonen, Teemu SALO, et al. Interface and Control Electronics for a Bulk Micromachined Capacitive Gyroscope[J]. IEEE Journal of Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147: 183–193.
- [2] Guangjun LIU, Anlin WANG, Tao JIANG, et al. A Novel Tuning Fork Vibratory Microgyroscope with Improved Spring Beams[C]// Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, Proceedings of the 3rd IEEE Int. Conf, Sanya, China, 2008: 257–260.
- [3] Jalpa Shah, Hourri Johari, AJIT Sharma, et al. CMOS ASIC for MHz Silicon BAW Gyroscope[J]. IEEE, 2008: 2458–2461.
- [4] Ajit Sharma, Mohamad Faisal Zaman, Farrokh Ayazi. A 104-dB Dynamic Range Transimpedance-Based CMOS ASIC for Tuning Fork Microgyroscopes[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007: 1790–1802.
- [5] Robert P Leland. Adaptive Mode Tuning for Vibrational Gyroscopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2003: 242–247.
- [6] Chen Yen-Cheng, Robert T M' Closkey, Tuan A Tran, et al. A Control and Signal Processing Integrated Circuit for the JPL-Boeing Micromachined Gyroscopes[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005: 286–300.
- [7] DONG Lili, ZHENG Qing, GAO Zhiqiang. A Novel Oscillation Controller for Vibrational MEMS Gyroscopes[C]//American Control Conference, Proceedings of the 2007, New York City, USA, 2007: 3204–3209.
- [8] Robert T M' Closkey, ALEX Vakakis. Analysis of a Microsensor Automatic Gain Control Loop[C]//Proceedings of the American Control Conference, San Diego, California, June 1999: 3307–3311.
- [9] 王展飞, 鲁文高, 李峰, 等. MEMS 振动陀螺闭环自激驱动的理论分析及数值仿真[J]. 传感技术学报, 2008, 21(8): 1337–1342.
- [10] FU Sheng-Meng. A Monolithic Sigma-Delta Fractional-N Frequency Synthesizer with Implicit Dual-Path Filter and Phase Switching Multi-Modulus Frequency Divider[J]. Analog Integr Circ Sig Process, 2007(51): 145–153.



谭晓昀(1960–),男,哈尔滨工业大学教授,主要研究方向为 MEMS 传感器及其集成化技术,txj@hit.edu.cn;



雷龙刚(1985–),男,陕西咸阳人,硕士,主要研究方向 MEMS 传感器接口集成电路,leilonggang9@163.com;



王冠石(1983–),男,哈尔滨市人,博士,主要研究方向为 MEMS 传感器接口集成电路,50644768@qq.com。