

文章编号 1004-924X(2013)07-1734-07

微机械陀螺检测接口建模及前置放大器优化

赵 阳, 裘安萍*, 施 芹, 赵 健

(南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心, 江苏 南京 210094)

摘要: 为了进一步提高微机械陀螺的极限分辨率, 建立了基于 SOI 工艺的微机械陀螺的检测接口模型, 并设计了与之相匹配的前置接口放大器。首先, 根据陀螺表头的实际结构建立了微机械陀螺表头的 RC 集总参数模型和微机械陀螺检测接口的噪声模型, 分析了检测接口主导噪声源及提高极限分辨率的措施。然后, 在跨阻式前置放大器的基础上设计了改进的与检测接口匹配的 T 型前置放大器。实验结果表明: 相比于跨阻式前置放大器, 采用改进的 T 型前置放大器的等效噪声输入电流由 $1.18 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 降低至 $0.27 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, 对应的电容极限分辨率可达到 $0.62 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。结果显示, 采用与检测接口匹配的 T 型前置放大器提高了微机械陀螺的极限分辨率。

关 键 词: 微机械陀螺; 接口模型; 极限分辨率; T 型前置放大器

中图分类号: TH824; V666.123 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132107.1734

Modeling of sensing interface for micromachined gyroscope and its front-end optimization

ZHAO Yang, QIU An-ping*, SHI Qin, ZHAO Jian

(MEMS Inertial Technology Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: apqiu@mail.njust.edu.cn

Abstract: To improve the resolving limit of a micromachined gyroscope, a sensing interface model for the micromachined gyroscope fabricated by Silicon on Insulator (SOI) process was established, and a matching front-end was designed. Firstly, a RC lumped parameter model for the gyroscope was established based on the practical gyroscope structure, then a noise model for the sensing interface was built. The dominant noise source and methods to improve the resolving limit were analyzed. Finally, on the foundation of a TIA front-end, an improved T-network front-end was designed to match the sensing interface. Experimental results indicate that the T-network front-end improves the sensing interface equivalent input noise current from $1.18 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ to $0.27 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$, corresponding to a capacitive resolution of $0.62 \text{ aF}/\sqrt{\text{Hz}}$ as compared to those of the transimpedance front-end. It suggests that the improved T-network front-end can reach a better resolution.

Key words: micromachined gyroscope; interface model; resolving limit; T-network front-end

1 引言

采用微机械加工工艺制造的微机械陀螺具有体积小、重量轻、可靠性高、成本低、可批量生产、易于与电子线路集成等优点,其无论在军事还是民用领域都具有广阔的应用前景^[1-2]。微机械陀螺的研究在近十几年间取得了长足的发展,其性能指标已经可以达到战术级别,正在向惯导级别迈进^[3-5]。微机械陀螺通常采用电容检测的方式来敏感输入角速度所引起的位移,其电容的变化在 $10^{-15} \sim 10^{-18}$ F 量级,最小检测电流也在 $10^{-12} \sim 10^{-15}$ A 量级,其前置接口电路的电容分辨率水平直接制约微机械陀螺性能的提高,决定了其可达到的极限性能。因此设计与微机械陀螺相匹配的高信噪比前置接口电路对于微机械陀螺性能的提高具有重要意义。

常用的微机械陀螺前置检测接口电路有跨阻式、积分式、开关电容式等^[6-8]。跨阻式前置放大器在提供高增益时需要使用很大的反馈跨阻,存在相位裕度低、动态过程存在长时间减幅振荡等问题;积分式前置放大器为了获得高增益需采用很小的反馈电容,其工作特性极易受到接口寄生电容的影响;开关电容式前置放大器无法利用分立元件构建,必须依赖于集成电路工艺。

本文针对南京理工大学 MEMS 惯性技术研究中心研发的微机械陀螺,建立了 RC 集总参数机电接口模型及检测接口噪声模型,并在跨阻式前置放大器的基础上设计了改进型的 T 型前置接口放大器,提高了微机械陀螺检测接口的极限电容分辨率。

2 微机械陀螺机电接口模型

2.1 微机械陀螺结构及工作原理

本文研究的是基于科里奥利效应的双质量块线振动式微机械陀螺,其结构如图 1 所示。该微机械陀螺采用自动增益控制的闭环方法进行驱动,工作时两质量块沿 X 轴相向振动,当输入 Z 轴方向的角速度时,两质量块产生 Y 轴方向相向的位移,通过检测梳齿间电容的变化来敏感输入角速度。

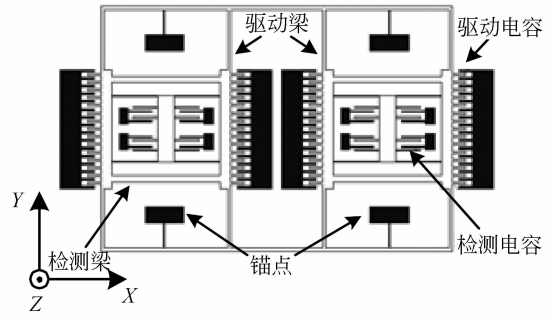


图 1 微机械陀螺结构示意图

Fig. 1 Schematic illustration of micromachined gyroscope

2.2 机电接口模型

根据图 1 所示的微机械陀螺结构示意图可将陀螺表头等效为如图 2 所示的 RC 集总参数模型,其中 C_{da} 和 C_{ds} 为陀螺的静态驱动电容及静态驱动检测电容, ΔC_{da} 和 ΔC_{ds} 为其对应的动态可变电容; C_{s+} 和 C_{s-} 为陀螺的两对静态检测电容, ΔC_{s+} 和 ΔC_{s-} 为其对应的动态可变电容; R_{e1} 为锚点连接梁的等效电阻, R_{e2} 为驱动梁等效电阻, R_{e3} 为敏感梁等效电阻; P_{da} 为陀螺驱动引脚, P_{dd} 为陀螺驱动检测引脚, P_{com} 为与质量块相连接的公共端, P_{s+} 和 P_{s-} 为陀螺的两个检测引脚。

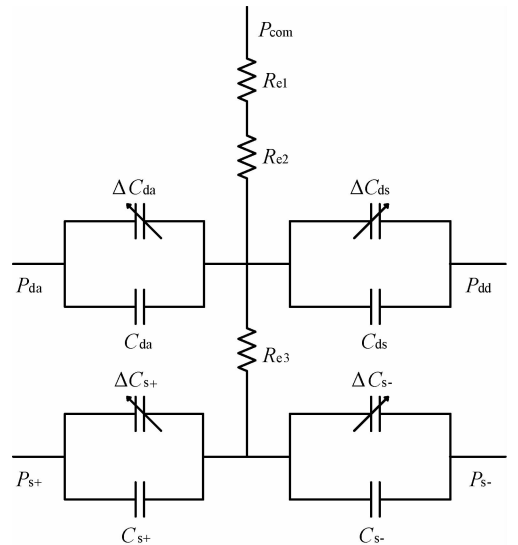


图 2 陀螺表头 RC 集总参数模型

Fig. 2 Lumped parameter model of micromachined gyroscope

将陀螺表头的 RC 集总参数模型与其驱动环路及检测前置接口电路相连接得到如图 3 所示的陀螺机电接口模型。

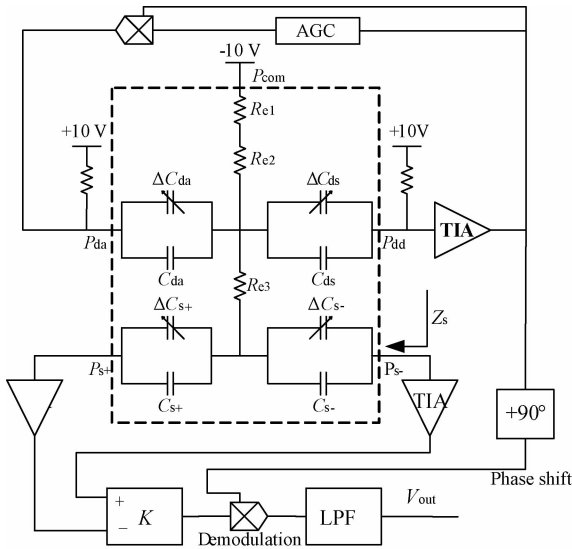


图 3 陀螺机电接口模型

Fig. 3 Electromechanical interface model of micro-machined gyroscope

将陀螺表头的 RC 参数视为检测前置放大器的输入负载,由图 2 所示 RC 集总参数模型的交流特性可得负载为:

$$Z_s = \frac{1}{s(C_{s-} + \Delta C_{s-})} + \frac{1}{s(C_{s+} + \Delta C_{s+})} \parallel \{R_{e3} + \left[\frac{1}{s(C_{da} + \Delta C_{da})} + \frac{1}{s(C_{ds} + \Delta C_{ds})} \right] \parallel (R_{e2} + R_{e1}) \}. \quad (1)$$

考虑到本文所研究微机械陀螺实际结构参数,式(1)中 $C_{da} = C_{ds} = 1.36 \text{ pF}$, $C_{s+} = C_{s-} = 6.74 \text{ pF}$, $R_{e1} = 13.9 \text{ }\Omega$, $R_{e2} = 16.7 \text{ }\Omega$, $R_{e3} = 16.4 \text{ }\Omega$,同时各动态变化电容远远小于其对应静态电容,则负载可简化近似为:

$$Z_s \approx \frac{1}{sC_s}. \quad (2)$$

以跨阻式前置放大器为例,微机械陀螺的完整检测接口模型如图 4 所示。

图 4 中 C_s 为陀螺表头的静态检测电容, C_{p1} 为陀螺表头总的寄生电容, C_{p2} 为前置放大器的输入电容, C_{p3} 为跨阻的寄生电容,为了表述方便,这里记 $C_{in} = C_s + C_{p1} + C_{p2}$, i_s 为检测可变电容所产生的检测电流源, e_n 为前置放大器的输入电压噪声源, i_{Rn} 为跨阻 R 的电流噪声源。

在该模型中,当跨阻 R 较大时与 C_{p3} 形成的极点频率通常较低,此时运算放大器的有限开环增益及自身的频率特性就不能忽略^[11],其由检测

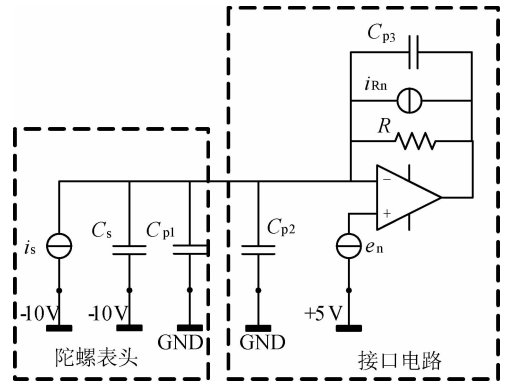


图 4 陀螺检测接口模型

Fig. 4 Sensing interface model of micro-machined gyroscope

电流 i_s 至检测前放输出电压 V_s 的传递函数可表示为:

$$H(s) = \frac{a_0}{\frac{C_{in} + C_{p3}}{\omega_0} s^2 + \left[C_{in} + a_0 C_{p3} + \frac{1}{R\omega_0} \right] s + \frac{a_0}{R}}, \quad (3)$$

式中: ω_0 为放大器的开环极点角频率, a_0 为放大器的开环直流增益。

2.3 接口模型测试

为了对图 4 所示的检测接口模型进行验证,同时得到 C_{in} 及 C_{p3} 的具体量值便于后续分析,这里在陀螺不进行闭环驱动的情况下由信号源在其检测电容两端(即 P_{com} 引脚)施加交变测试信号 V_t ,此时由于陀螺处于静止状态,检测电容两端产生的电流只与测试信号的幅度及频率相关,通过改变 V_t 的频率对检测前置放大器进行扫频测试,检测跨阻 R 为 $20 \text{ M}\Omega$ 的增益归一化扫频测试结果如图 5 所示。

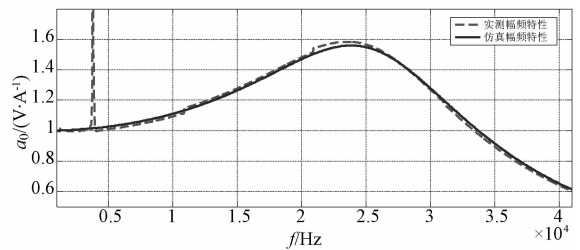


图 5 幅频特性测试与仿真结果

Fig. 5 Comparison of amplitude frequency characteristics between experiment and simulation results

根据扫频测试结果与式(3)所示传递函数对比可得到 $C_{in} = 12 \text{ pF}$, $C_{p3} = 0.2 \text{ pF}$,同时由图 5 中

实际测试结果与仿真结果的对比可知,该模型可以很好地用来模拟检测接口实际的工作特性,具有很好的一致性(其中实测曲线的尖峰是由于测试信号在扫频过程中激发了陀螺工作模态所造成的)。

3 检测接口噪声分析及测试

3.1 跨阻式前置噪声分析

由于本文所研究微机械陀螺采用了真空封装技术,其 Q 值高达100 000以上,机械热噪声^[9-10]相对较小,因此在图4所示的检测接口模型中主

要的噪声源为 $e_n(f)$ 及 $i_{Rn}(f)$ 。其中 $e_n(f)$ 为提供+5 V偏置的稳压源与检测运算放大器的噪声之叠加, $e_n(f) = 230 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$; $i_{Rn}^2(f) = 4kT/R$,其中 k 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度。

图4所示检测接口模型中, $e_n(f)$ 的输出增益为:

$$A_{en}(jf) = \frac{1 + R(C_{in} + C_{p3}) \times 2\pi jf}{1 + RC_{p3} \times 2\pi jf}, \quad (4)$$

$i_{Rn}(f)$ 的增益为

$$A_{Rn}(jf) = \frac{R}{RC_{p3} \times 2\pi jf + 1}, \quad (5)$$

则检测前放等效输入噪声电流为:

$$i_n(f) = \frac{1}{R} \sqrt{\left[\int_0^{\infty} e_n(f) \times A_{en}(jf) \right]^2 + \left[\int_0^{\infty} i_{Rn}(f) \times A_{Rn}(jf) \right]^2}. \quad (6)$$

将式(4)、(5)代入式(6)可得:

$$i_n(f) = \sqrt{\int_0^{\infty} \left[e_n(f) \times \frac{1/R + (C_{in} + C_{p3}) \times 2\pi jf}{1 + RC_{p3} \times 2\pi jf} \right]^2 + \left[\frac{4kT}{R} \times \frac{1}{RC_{p3} \times 2\pi jf + 1} \right]^2}. \quad (7)$$

在式(7)中考虑各参数的实际量值可知,与 $i_{Rn}(f)$ 相比, $e_n(f)$ 为限制检测接口极限分辨率的主导噪声源。同时由上式可知增大检测前放跨阻 R 可以有效地降低等效输入噪声电流,提高陀螺的极限分辨率。

虽然在跨阻式前置放大器中增大跨阻 R 可以降低检测接口的等效输入噪声电流,但是跨阻 R 的最大值受到寄生电容 C_{p3} 的极大制约,为了保证陀螺工作频段信号不被衰减且保证一定带宽,必须满足:

$$R \leq \frac{1}{2\pi f_d C_{p3}}, \quad (8)$$

其中: f_d 为陀螺工作频率,以 $f_d = 4 \text{ kHz}$ 、 $C_{p3} = 0.2 \text{ pF}$ 为例,则跨阻 R 最大值只能达到80 M Ω 左右。

由图6以 R 为参量的广义根轨迹^[12]可知,增大检测前放跨阻将导致两极点靠近虚轴,相位裕度降低,稳定性变差,动态响应时间增长;同时在对应的幅频特性中凸峰频率向低频段移动,导致陀螺工作带宽内的噪声被放大,直接影响陀螺的零偏稳定性水平;另一方面,使用较大的电阻其精度及温度系数指标相对较差,陀螺检测接口的工作特性也将更大的受到寄生电容 C_{p3} 的影响。

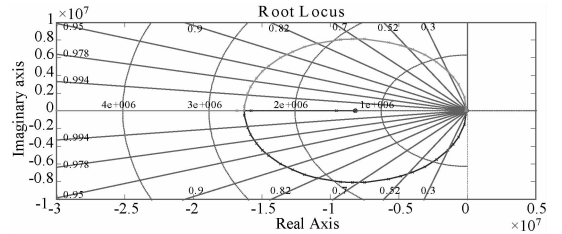


图6 检测前放以 R 为参量的广义根轨迹

Fig. 6 Root locus of TIA front-end

跨阻式前置放大器中大电阻的使用受以上诸多因素的制约,为了进一步提高微机械陀螺接口的分辨率,必须对跨阻式前置放大器进行改进使其可实现更高的增益及更低的噪声水平。

3.2 改进的T型接口放大器分析

图7所示的T型前置放大器可利用反馈回路中3个低阻值电阻实现高跨阻增益^[13],其等效跨阻为:

$$R_{feq} = R_1 + \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) R_T \approx \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) R_T. \quad (9)$$

通常取 $R_T \gg R_1$,故 R_2, R_1, R_2 的热噪声可以忽略,在T型前置放大器中只需考虑 R_T 的热噪声 $i_{R_{Tn}}(f)$ 与放大器输入噪声 $e_n(f)$ 。

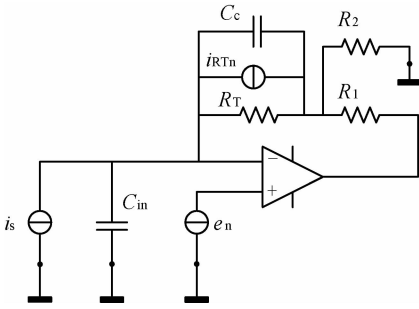


图 7 T 型检测接口放大器

Fig. 7 Model of T-net front-end

$e_n(f)$ 的输出增益为:

$$A_{en}(jf) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{1 + R_T(C_{in} + C_c) \times 2\pi jf}{1 + R_{feq}C_c \times 2\pi jf} \quad (10)$$

$i_{RT}(f)$ 的输出增益为:

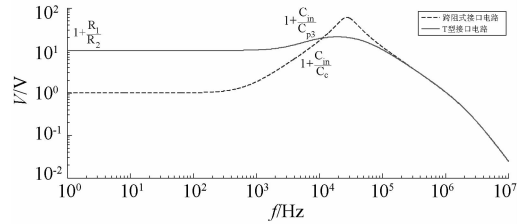
$$A_{RTn}(jf) = \sqrt{1 + \frac{R_1}{R_2}} \times \frac{R_T}{R_T C_c \times 2\pi jf + 1} \quad (11)$$

由式(11)可知,相比于跨阻式前置放大器,T型前置放大器在同样等效跨阻情况下将跨阻 R 的输出热噪声放大了 $\sqrt{1 + R_1/R_2}$ 倍,然而由于 $e_n(f)$ 为检测接口的主导噪声源,故增大的部分电阻热噪声对于整个检测接口性能的影响并不大;由式(10)及图 8 可知,T型接口电路中 $e_n(f)$ 的低频段增益为 $1 + R_1/R_2$,相比于跨阻式前置放大器增大了 R_1/R_2 倍,噪声主导中频段增益约为 $1 + C_{in}/C_c$,相比于跨阻式前置放大器其噪声主导频段增益约为 $1 + C_{in}/C_{p3}$,故只要保证 $C_c > C_{p3}$,同时 R_1/R_2 不至于过大(通常取 2~10 倍)即可保证 T 型接口放大器在获得高等效跨阻的同时比跨阻式接口放大器实现更低的噪声水平^[14]。此外如图 8 所示,由于补偿电容 C_c 改善了相位裕度,抑制了幅频特性中的凸峰,使得 T 型接口放大器相比于跨阻式接口放大器具有更好的动态响应性能。

相比于跨阻式前置放大器,T型前置接口放大器的最大优点在于使用小阻值的 R_T ,打破了式(8)对于最大跨阻 R 的限制,在 T 型前置接口放大器中 R_T 及 C_c 决定了其可实现的最大等效跨阻:

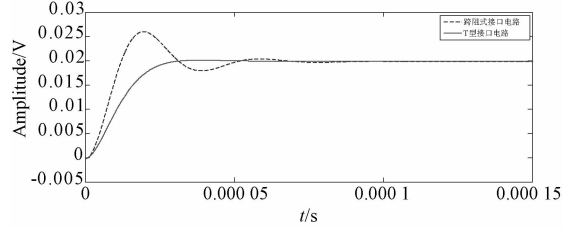
$$R_{feq} \leq \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \times \frac{1}{2\pi f_d C_c} \quad (12)$$

从而可以获得比跨阻式前置放大器更高的电容分辨率水平。



(a) 噪声增益对比

(a) noise gain comparison



(b) 动态响应对比

(b) Comparison of noise gain and dynamic response

图 8 两种接口电路对比

Fig. 8 Comparison of noise gain and response between TIA and T-net front-end

综合上述分析可知,相比于跨阻式前置接口放大器,虽然 T 型接口放大器中的跨阻热噪声被一定程度地放大,但是却可以抑制运算放大器的输入噪声,同时获得更高的跨阻增益,只要合理设计 R_T, R_1, R_2 的阻值,利用 C_c 进行适当的带宽限制及相位补偿就可以实现具有高信噪比、低输入噪声的前置接口电路。

3.3 测试与分析

选用南京理工大学设计的微机械陀螺进行两种前置接口放大器的噪声水平对比实验,其主要技术参数如表 1 所示。

表 1 微机械陀螺关键参数

Tab. 1 Key parameters of researched micromachined gyroscope

驱动频率 /Hz	检测频率 /Hz	品质 因数	量程 /(°) · s ⁻¹	带宽 /Hz
3 836	4 253	>100 000	±300	100

分别对 20 MΩ 的跨阻式前置接口放大器以及 20,70 和 120 MΩ 3 种不同等效阻值的 T 型前置接口放大器进行等效输入噪声电流的功率谱测试,利用 NI 公司 USB6366 数据采集卡以 100 kHz 采样率分别采集两种检测接口电路对应的检测前输出电压信号,绘制两种检测接口电路对应的输入

噪声电流功率谱图 9 所示。

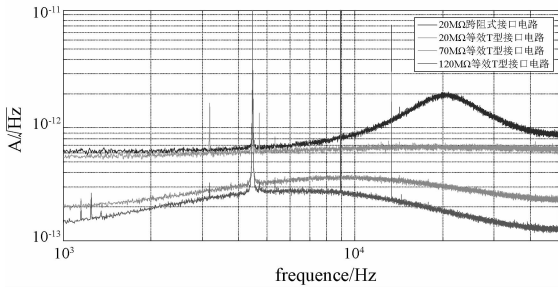


图 9 两种接口电路噪声水平对比

Fig. 9 Comparison of input noise floor experiment result between TIA and T-net front-end

由图 9 所示测试结果可知,设计的 T 型前置接口放大器由于增加了补偿电容 C_c ,消除了跨阻式前置接口放大器噪声功率谱中存在的凸峰,大大降低了前置接口放大器的噪声水平。此外,T 型前置接口放大器可以实现更高的跨阻增益,同时可以看到随着等效跨阻值的增大,可以获得更低的输入噪声电流,这与理论分析吻合。由表 2 可知,在 120 MΩ 等效的 T 型前置接口放大器中,等效输入噪声电流为 0.27 pA/√Hz,相比于 20 MΩ 跨阻式前置接口放大器的等效输入噪声电流 1.18 pA/√Hz 降低了 77.1%,其对应的电容分辨率可达到 0.62 aF/√Hz。

表 2 实验测试结果对比

Tab. 2 Comparison of experiment results

$R_T /$ MΩ	$R_1 /$ kΩ	$R_2 /$ kΩ	$C_c /$ pF	$R_{ieq} /$ MΩ	输入噪 声电流 (pA/√Hz)	电容 分辨率 (aF/√Hz)
20	0	无	无	20	1.18	2.71
5	3	1	7	20	0.68	1.56
7	9	1	5	70	0.36	0.83
20	5	1	2	120	0.27	0.62

4 结 论

本文建立了所研究的微机械陀螺表头的 RC 集总参数模型,并在此基础上建立了其检测接口噪声模型。分析结果表明,运算放大器输入噪声为检测接口的主导噪声源,提高检测接口前置放大器跨阻可有效降低其等效输入噪声电流,提高微机械陀螺极限分辨率。设计了一种与检测接口匹配的 T 型前置接口放大器,该接口电路可实现更高的跨阻增益及更低的噪声水平,实验结果表明,T 型前置接口放大器的等效输入噪声电流相比于跨阻式前置接口放大器由 1.18 pA/√Hz 降低至 0.27 pA/√Hz,其电容极限分辨率可达到 0.62 aF/√Hz。

参考文献:

[1] 刘危,解旭辉,李圣怡. 微机械惯性传感器的技术现状及展望[J]. 光学精密工程,2003,11(5): 425-431.
LIU W, XIE X H, LI SH Y. Present state and perspectives of micromachined inertial sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(5): 425-431. (in Chinese)

[2] BARBOUR N, SCHMIDT G. Inertial sensor technology trends [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2001, 1(4):332-339.

[3] YAZDI N, AYAZI F, NAJAFI K. Micromachined inertial sensors [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8): 1640-1659.

[4] JASON K P H. *Modeling and Identification of the Jet Propulsion Laboratory Vibratory Rate Microgyroscope* [D]. Los Angeles: Mechanical engi-

neering, University of California, 2002.

[5] CHOI B D, PARK S, KO H, *et al.*. The first sub-deg/hr bias stability silicon-microfabricated Gyroscope [C]. *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, *Transducers*, 2005: 180-183.

[6] JIANG X S. *Capacitive Position-sensing Interface for Micromachined Inertial Sensors* [D]. California: University of California, Berkeley, 2003.

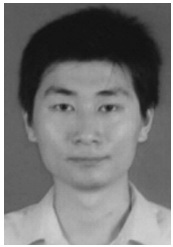
[7] ACAR C. *Robust Micromachined Vibratory Gyroscopes* [D]. California:Irvine University of California, 2004.

[8] 李锦明. 电容式微机械陀螺仪设计 [M]. 北京:国防工业出版社,2006.
LI J M. *Design of Capacitive Micromechanical Gyroscope* [M]. Beijing: National Defense Industrial Press, 2006. (in Chinese)

[9] GABRIELSON T B. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors [J].

- IEEE Trans on Electron Devices*, 1993, 40 (5): 903-909.
- [10] 刘梅,周百令. 硅微陀螺机械热噪声研究 [J]. 仪器仪表学报,2006,27(S2):1163-1164.
LIU M, ZHOU B L. Research on mechanical-thermal noise in micromachined gyroscopes [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2006, 27(S2): 1163-1164. (in Chinese)
- [11] FRANCO S. *Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits* [M]. New York: McGraw Hill, 2002.
- [12] RICHARD C D. *Modern Control Systems* [M]. Pearson Education, 2008.
- [13] GRAEME J. *Photodiode Amplifiers: OP Amp Solutions* [M]. New York: McGraw Hill, 1996.
- [14] SHARMA A, ZAMAN M F, AYAZI F. A 104 db SNDR Transimpedance-Based CMOS ASIC Fortuning Fork Micro Gyroscopes [C]. *IEEE Custom Integrated Circuits Conference*, 2006: 655-658.

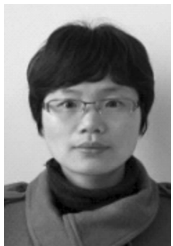
作者简介:



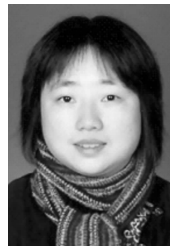
赵 阳(1988—),男,河南洛阳人,博士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性技术方面的研究。E-mail: zhaoyang0216@yeah.net



赵 健(1988—),男,陕西西安人,博士研究生,2011年于南京理工大学获得学士学位,主要从事 MEMS 惯性技术方面的研究。E-mail: elfevil007@126.com



施 芹(1977—),女,江苏东台人,博士,讲师,2006年于东南大学获得博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术的研究。E-mail: sqinhy@mail.njust.edu.cn



裘安萍(1971—),女,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,1998年、2001年于东南大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 惯性技术的研究。E-mail: apqiu@mail.njust.edu.cn

导师简介:

(版权所有 未经许可 不得转载)