

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2023.01.014

一种可实现增益、带宽独立调控的低噪声 MEMS 加速度计接口电路设计

王皓, 张晶, 周同, 周怡, 苏岩

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为了进一步满足振梁式加速度计(VBA)对前端放大接口电路增益、带宽以及噪声的更高要求,提出了一种适用于硅微振梁式加速度计的可实现增益、带宽独立调控的低噪声前端放大接口电路。该设计基于T型接口电路的两级拓扑结构,有效解决了增益、带宽和噪声之间的制约问题。通过仿真与实验结果表明,该设计在等效跨阻增益为 $40\text{M}\Omega$ 的前提下,最终实现了带宽为 410kHz 、相位误差为 1.2° 、等效输入电流噪声密度为 $8.9\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。基于该设计的实验样机在上电稳定后1h零偏不稳定性达 $1.156\mu\text{g}$,相较于传统一级跨阻接口电路减小了 49.2% ($2.274\mu\text{g}$),验证了该新型接口电路的可行性和优越性。

关键词: 前端放大接口电路; 噪声; 带宽; 硅微振梁式加速度计

中图分类号: U666.1 文献标志码: A 文章编号: 2095-8110(2023)01-0133-08

A Low-Noise MEMS Accelerometer Interface Circuit Design that Enables Independent Regulation of Gain and Bandwidth

WANG Hao, ZHANG Jing, ZHOU Tong, ZHOU Yi, SU Yan

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to further meet the higher requirements of gain, bandwidth and noise of front-end amplifier interface circuit for vibrating beam accelerometer, a low-noise front-end amplifier interface circuit that can realize independent control of gain and bandwidth is proposed. The design is based on the two-stage topology of T-type interface circuit, which effectively solves the constraints among gain, bandwidth and noise. The simulation and experimental results show that the design achieves a bandwidth of 410kHz , a phase error of 1.2° , and an equivalent input current noise density of $8.9\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ on the premise of equivalent transimpedance gain of $40\text{M}\Omega$. The zero bias instability of the experimental prototype based on this design reaches $1.156\mu\text{g}$ at 1h after the prototype is powered on and stabilized. Compared with the traditional one-stage transimpedance interface circuit, the zero bias instability is reduced by 49.2% ($2.274\mu\text{g}$), which verifies the feasibility and superiority of the new interface circuit.

Key words: Front-end amplification interface circuit; Noise; Bandwidth; Vibrating beam accelerometer

收稿日期: 2022-07-09; 修订日期: 2022-08-03

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB3201604); 国家自然科学基金(62101263); 江苏省自然科学基金(BK20190417)

作者简介: 王皓(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事 MEMS 惯性传感器方面的研究。

通信作者: 周同(1985-), 男, 副教授, 主要从事 MEMS 惯性传感器方面的研究。

0 引言

微机电 (Micro-Electro-Mechanical-System, MEMS) 加速度计已经成为不可或缺的传感器应用于汽车到生物学、国防到民用基础设施等各个领域^[1-3], 涉及各种小尺寸、低功耗和高性能应用。相较于各种类型的 MEMS 加速度计, 谐振式加速度计具有动态范围大、灵敏度高等优势, 在高精度应用领域具有巨大潜力^[4-6]。

振梁式加速度计 (Vibrating Beam Accelerometer, VBA) 本质上是机械频率调制检测机制, 属于谐振式加速度计的一种。低噪声高灵敏度 MEMS 谐振式加速度传感元件和低噪声接口电路是实现高精度测量的必要条件。通过对谐振式加速度计传感元件采取真空封装, 实现谐振器的高 Q 值以降低等效机械噪声^[5-7]。谐振式加速度计机械结构振荡的检测电流信号属于微弱信号 (通常是 nA 级别), 极易受到噪声的干扰, 检测较为困难, 需要通过前端放大接口电路进行放大, 继而进入到后续的控制电路中。因此, 设计合理的低噪声、高增益的前端放大接口电路是保证硅微谐振式加速度计性能的关键。

传统的前端放大接口电路难以解决增益、带宽、噪声及功耗等指标的制约问题。例如, 开关电容式前端放大电路存在噪声混叠现象, 使其不得不消耗更大的功耗来限制噪声^[8-10]。同时, 由于寄生电容的存在, 单级或多级传统跨阻式放大电路难以解决带宽、增益和噪声之间的矛盾^[11-12]。美国佐治亚理工学院提出了一种基于 T 型电阻网络的跨阻式放大器^[13], 可利用小阻值电阻网络实现高跨阻增益。由于避免了直接使用大阻值跨阻, 补偿电容对带宽的限制作用也被减弱, 因此该 T 型网络跨阻式放大器可在实现高跨阻增益的同时保持较大的信号带宽。但是由于电阻的电流噪声与其阻值成反比例, 随着反馈电阻阻值的下降, 该 T 型跨阻式放大器的等效电流噪声性能将恶化。同时, 其他电阻的引入, 会导致电路整体的输出电压噪声性能变差。斯坦福大学的研究者报道了一种应用于 MEMS 振荡器的电容反馈型跨阻式放大器结构^[14], 由于电容为无噪声元件, 在利用电容比例对跨阻进行放大的同时并未引入额外的噪声, 因此该电路结构具有极低的电流噪声水平。但是由于缺少必要的直流反馈网络, 导致该电路的直流失调电压直接被放大器开环放大, 严重限制了输出摆幅。南京理工大学赵阳提出了

带通跨阻式拓扑结构^[15], 该电路避免直接使用大阻值电阻, 解决了跨阻式放大器高增益与大带宽间的制约问题, 并通过电容元件的无噪声特性降低了电路噪声。同时, 该电路提供了合理的直流反馈路径, 解决了直流失调误差对接口电路动态范围的制约。带通跨阻式拓扑结构虽然极大地缓解了增益与带宽的制约问题, 但仍存在一定的限制, 无法对增益和带宽进行更大自由度的调节。综上所述, 前端放大接口电路的设计是一个挑战。

针对现有研究中存在的增益与带宽的制约问题, 本文提出了一种可实现增益、带宽独立调控的低噪声 MEMS 加速度计前端放大接口电路设计。第一章介绍了 VBA 的敏感原理以及谐振器驱动与检测机理; 第二章针对谐振器检测电流信号较为困难的问题, 从原理上解释了新型 VBA 接口电路如何解决增益与带宽之间的制约问题并获得极低的电流噪声; 第三章开展了新型 VBA 接口电路性能仿真验证以及实际的测试验证, 结果证明了该电路的可行性和优越性。

1 VBA 基本原理

1.1 VBA 工作原理

本文所述 VBA 的敏感机械结构如图 1 所示, 在同一平面内包含 5 个主要部分: 谐振器、微杠杆、质量块、支撑结构、框架及锚点。2 个双端固支的音叉式谐振器, 每个谐振器通过 2 组对称的微杠杆机构与质量块相连, 质量块通过支撑机构和谐振器共同连接在框架上。整体结构在 y 、 z 方向的刚度很大, 不易产生运动; 而在 x 方向上刚度低, 容易敏感该方向的加速度输入, 因此该振梁式加速度计又可称作面内单轴谐振式加速度计。

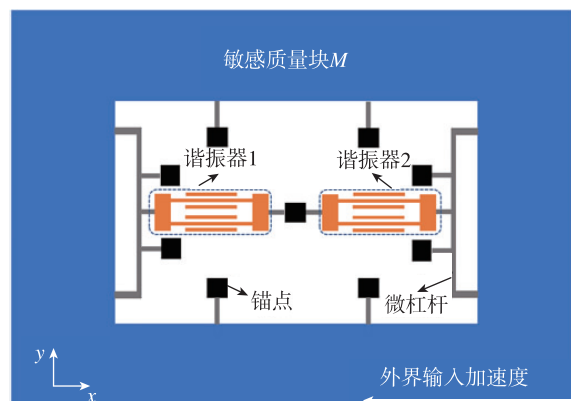


图 1 VBA 敏感结构示意图

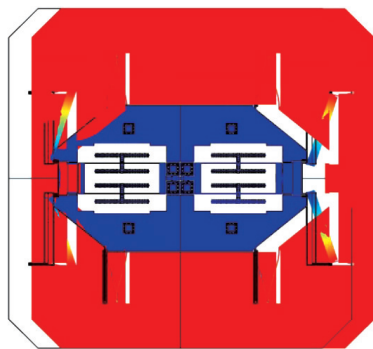
Fig. 1 Schematic diagram of VBA

当外界加速度作用在 x 方向上时,质量块沿 x 轴发生平动,同时产生惯性力作用在微杠杆上。惯性力通过微杠杆得到放大并传递给谐振器,分别在 2 个对称的谐振器末端产生推力和拉力,使得一个谐振器因受压而振动频率降低,另一个谐振器因受拉而振动频率增大。此时,差分的频率变化与外界加速度产生了正相关。这种全差分谐振器测量结构使得非线性将会在很大程度上被抑制,从而提升加速度计量程范围内的对称性。差分后经整理,加速度的表达式如下

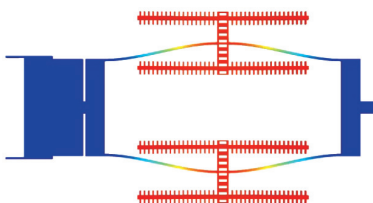
$$a = \frac{EI}{2\lambda ML^2} \frac{(f_{m_1}^2 - f_{m_2}^2)}{f_n^2} \quad (1)$$

式中, a 为输入加速度; ω_n 为谐振梁的固有频率; M 为敏感质量块质量; L 、 I 、 λ 为谐振器几何尺寸决定的常数; E 为材料的弹性模量; f_{m_1} 和 f_{m_2} 分别代表两路谐振器的振荡频率。

图 2(a)和(b)分别给出了 2 个最关键的工作模式图:质量块沿 x 方向平动的检测模式,用来敏感待测加速度;谐振梁沿 y 方向弯曲振动的驱动模式,用来激发谐振器固有频率的振荡信号,便于测控电路的检测。敏感加速度模式的固有频率被设计为比谐振器驱动模式的频率低 1 个数量级以上,保证较好的模式隔离与器件的正常工作。



(a) 敏感加速度模式



(b) 谐振器驱动模式

图 2 工作模式示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the working mode

1.2 谐振器的驱动与检测

谐振器是 VBA 的核心部件之一,VBA 就是通过两路谐振器的振荡频率来标定所受到的加速度。图 3 所示为单个谐振器的静电驱动和电容检测示意图,外接电路通过给谐振器驱动梳齿接入交变电压 V_{ac} ,使得谐振器在一阶模态上受迫振动,谐振梁的振动会导致电容的变化,保持检测电极的电压不变,则检测梳齿电容上储存的电荷会发生变化产生电流 I_s ,这样就可以通过检测电流的变化实现对谐振器运动的检测。

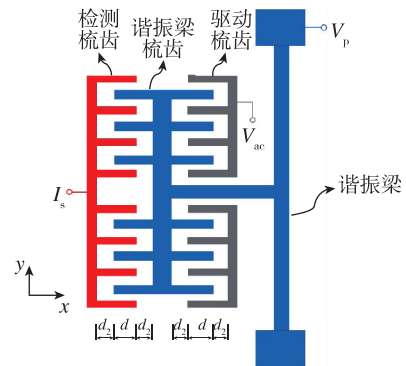


图 3 谐振器静电驱动与电容检测示意图

Fig. 3 Schematic diagram of resonator electrostatic drive and capacitance detection

驱动梳齿产生静电力使得谐振梁产生位移 x 时,驱动电容和检测电容为

$$C = \frac{2N\epsilon b(d+x)}{g} \quad (2)$$

谐振梁上施加了直流偏置电压 V_p ,驱动梳齿上施加了交流驱动电压 $V_{ac(t)}$,作用在梁上的静电驱动力 P 和检测电流 I_s 可分别表示为^[9]

$$P(t) \approx \frac{\partial C}{\partial x} V_p \cdot V_{ac(t)} \quad (3)$$

$$= \frac{2N\epsilon b}{g} V_p |V_{ac}| \sin(\omega t)$$

$$I_s = \frac{dC}{dx} V_p \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{2N\epsilon b}{g} V_p \dot{x} \quad (4)$$

由式(4)可知,检测电流幅值正比于振动速度幅值。表 1 所示为梳齿电极关键参数,本次工作采用的 VBA^[10]由本教研室自主研发,该 VBA 谐振器的谐振频率为 19.95kHz。在幅值为 1mV 的交流驱动电压下,谐振梁的振动幅值为 56nm,输出检测电流幅值为 1.4nA,因此需要设计高增益、低噪声的前端放大接口电路,实现微弱信号的放大输出。

将放大的输出电压信号通过后续的频率测量电路得出谐振频率,进而标定加速度,完成加速度的测量。

表 1 梳齿电极关键参数

Tab. 1 Key parameters of comb electrode

| 参数符号 | 定义 | 数值 | 单位 |
|------------|---------|------------------------|---------------|
| N | 谐振梁梳齿个数 | 43 | — |
| ϵ | 介电常数 | 8.85×10^{-12} | F/m |
| b | 敏感结构厚度 | 80 | μm |
| g | 梳齿间隙 | 3 | μm |
| V_p | 偏置电压 | 10 | V |

2 VBA 接口电路设计

2.1 工作原理及幅频特性分析

VBA 的前端放大接口电路设计除了需要满足振荡条件所需的环路增益和带宽外,还需满足极低的电路噪声以实现高稳定性。对于高增益跨阻抗的前端放大电路来说,考虑到其稳定性问题,通常需要并联补偿电容。在图 4 中, C_c 就代表这种补偿电容, C_p 代表极板和键合线所产生的输入寄生电容(通常在 pF 范围内)。

为了获得增益与带宽、噪声之间更高的自由度且实现极低的电路噪声,本文提出了一种新型的可实现增益、带宽独立调控的低噪声前端放大接口电路设计,如图 4 所示。

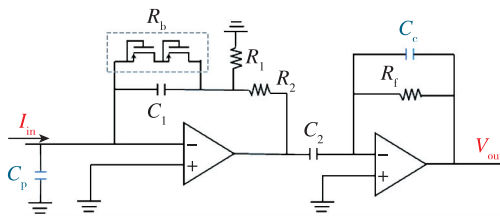


图 4 新型可独立调控低噪声接口电路

Fig. 4 A new low noise interface circuit with independent regulation

本接口电路包括两部分:以电容 C_1 、寄生电容 C_p 、伪电阻 R_b 、电阻 R_1 、电阻 R_2 、跨导放大器 OTA1 构成的第一级 T 型放大;电容 C_2 、电容 C_c 、电阻 R_f 、跨导放大器 OTA2 构成的第二级跨阻放大。驱动检测电流至电压输出的总传递函数为

$$H(s) = \frac{V_{\text{out}}}{I_{\text{in}}} = H_1(s) \cdot H_2(s)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{R_b \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)}{1 + R_b C_1 s} \cdot \frac{R_f C_2 s}{1 + R_f C_c s} \\ &= \frac{R_b R_f C_2 \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) s}{(1 + R_b C_1 s)(1 + R_f C_c s)} \end{aligned} \quad (5)$$

式(5)具有带通特性,截止频率为

$$\begin{aligned} \omega_L &= \frac{1}{R_b C_1} \\ \omega_H &= \frac{1}{R_f C_c} \end{aligned} \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,只要确保硅微加速度计的驱动谐振频率满足 $\omega_L \ll \omega_0 \ll \omega_H$, 则第一级放大器可近似为对驱动检测电流信号的积分器,其输出正比于振荡位移信号,而第二级结构则视为对位移信号的微分器,其输出为振荡速度信号。此时,该新型 VBA 接口电路的等效跨阻为

$$R_{\text{eq}} = \frac{R_f C_2}{C_1} \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \quad (7)$$

由上述分析可知,可利用小阻值电阻及适当的电容电阻比 $(C_2/C_1)(R_2/R_1 + 1)$ 实现等效的高跨阻增益。由于避免了直接使用高阻值电阻,因此稳定性补偿电容对带宽的制约作用大大降低。由式(6)和式(7)可知,其带宽与跨阻增益可独立进行配置,因此该前置接口电路可在提供 $M\Omega$ 量级跨阻增益的同时保持较高的带宽,降低了接口电路所引入的相位误差。为了实现小于 1° 相位误差的目标, ω_L 及 ω_H 应满足

$$20\omega_L < \omega_0 < \frac{1}{20}\omega_H \quad (8)$$

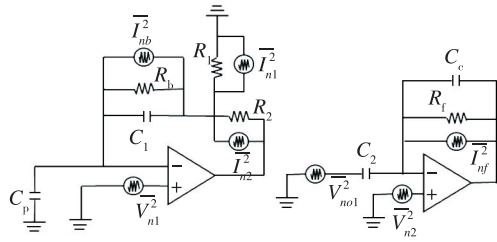
2.2 电流噪声模型分析

在满足电路所需增益和带宽的基本条件下,追求更低的电路噪声一直是电路设计的目标。新型 VBA 接口电路噪声模型如图 5(a)所示,主要噪声来源为两级放大器的输入电压噪声及直流反馈电阻 R_b 、 R_1 、 R_2 和跨阻 R_f 的电流噪声。上述六项噪声源互不相关,在满足 $\omega_L \ll \omega_0 \ll \omega_H$ 的条件下,可计算得到其等效输入电流噪声功率为

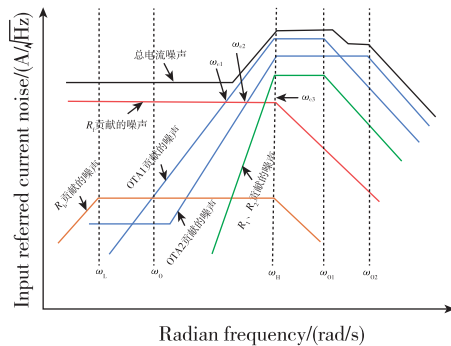
$$\begin{aligned} \overline{I_n^2} &\cong \overline{I_{nf}^2} \frac{1}{\left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)^2} + \overline{I_{nb}^2} + \overline{V_{n1}^2} \omega^2 (C_1 + \\ &C_p)^2 + \overline{V_{n2}^2} \frac{1 + R_f^2 C_2^2 \omega^2}{R_f^2 \left(\frac{C_2}{C_1}\right)^2 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)^2} + \end{aligned}$$

$$\overline{I_{n1}^2} \frac{(R_2 C_1 \omega)^2}{\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)^2} + \overline{I_{n2}^2} \frac{(R_2 C_1 \omega)^2}{\left(\frac{R_2}{R_1} + 1\right)^2} \quad (9)$$

由式(9)可知,伪电阻 R_b 的电流噪声直接体现在输入电流噪声中,增大伪电阻的阻值有利于降低该部分噪声。 R_f 的电流噪声通常为跨阻式接口电路中的主导噪声源,折算为输入电流噪声时,电阻 R_f 产生的电流噪声被比例 $(C_2/C_1)(R_2/R_1 + 1)$ 所抑制。因此,相较于同等增益的跨阻式放大电路,该前置接口电路可实现更低的噪声水平。由放大器 OTA1、OTA2、 R_1 、 R_2 贡献的输入电流噪声具有微分特性,如图 5(b)所示,只要满足 $\omega_0 < \omega_{c1}, \omega_{c2}, \omega_{c3}$,那么在加速度计工作频率处输入电流噪声将只由跨阻 R_f 的噪声决定。



(a) 噪声模型



(b) 输入电流噪声谱密度

图 5 接口电路噪声分析图

Fig. 5 Interface circuit noise analysis diagram

使式(9)中其余噪声分量项小于第一项电阻 R_f 所贡献的噪声,从而总结出该新型 VBA 接口电路的设计准则为

$$R_b > R_f \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^2 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)^2$$

$$R_1, R_2 > R_f (R_2 C_2 \omega_0)^2$$

$$\overline{V_{n1}^2} < \frac{4k_B T}{R_f} \left[C_2 \left(\frac{C_p}{C_1} + 1 \right) \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \omega_0 \right]^2$$

$$\overline{V_{n2}^2} < \frac{4k_B T R_f}{1 + R_f^2 C_2^2 \omega_0^2} \quad (10)$$

在满足式(10)后,最终等效输入电流噪声为

$$\overline{I_n^2} \cong \frac{4k_B T}{R_f} \left(\frac{C_2}{C_1} \right)^2 \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right)^2 \quad (11)$$

根据以上分析,新型 VBA 接口电路具有以下优势:

- 1) 无需大阻值 R_f 就可实现等效高跨阻增益,降低了补偿电容 C_c 对带宽的限制,极大缓解了传统跨阻式放大电路高增益与大带宽的制约;
- 2) 电阻 R_f 的噪声被比例 $(C_2/C_1)(R_2/R_1 + 1)$ 所抑制,有利于实现低输入电流噪声和高信噪比;
- 3) 高阻值直流反馈电阻 R_b 可自动补偿由输入电容 C_p 引起的稳定性隐患;
- 4) 两级放大器均具有支流反馈网络,且两级之间通过电容耦合,消除了直流失调误差带来的影响;
- 5) 可同时提供驱动位移信号及速度信号输出。

3 VBA 接口电路性能验证

3.1 电路仿真验证

根据式(8)及式(10)的设计准则,运算放大器选择 ADI 公司的 AD8034。放大器 AD8034 及外围阻容元器件的关键参数如表 2 所示。由式(7)可知,所设计的接口电路在通频段的等效跨阻增益为 $40\text{M}\Omega$ (152dB)。如图 6(a)所示,本文设计的接口电路在保持 $40\text{M}\Omega$ 等效跨阻增益的前提下,取 -3dB 带宽的通频段范围为 $2\text{Hz} \sim 580\text{kHz}$,在 VBA 谐振器工作频率 (19.95kHz) 处,相位误差小于 1° 。

表 2 元器件设计参数

Tab. 2 Component design parameters

| 放大器参数 | AD8034 | 无源器件参数 | 设计值 |
|--------|---------------------------|------------|---------------|
| 输入偏置电流 | 1pA | R_b | 100G Ω |
| 失调电压 | 1mV | C_1, C_2 | 1pF, 20pF |
| 输入电流噪声 | 0.6fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | R_f | 1M Ω |
| 输入电压噪声 | 11nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | R_1, R_2 | 1k Ω |
| 增益带宽积 | 80MHz | C_c | 0.4pF |

新型 VBA 接口电路的噪声仿真曲线如图 6(b) 所示,在通频段内等效输入电流噪声近似为白噪声,该部分噪声主要由跨阻 R_i 产生。在高频域噪声开始线性增长,该特性来自于对 2 个放大器电压噪声及电阻 R_1 、 R_2 产生噪声的微分特性,电阻 R_b 阻值非常大 ($100\text{G}\Omega$),其电流噪声可忽略不计 ($<1\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$),上述噪声特性与式(9)的分析一致。在 VBA 谐振器的工作频率 (19.95kHz) 处,输入电流噪声为 $5.9\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

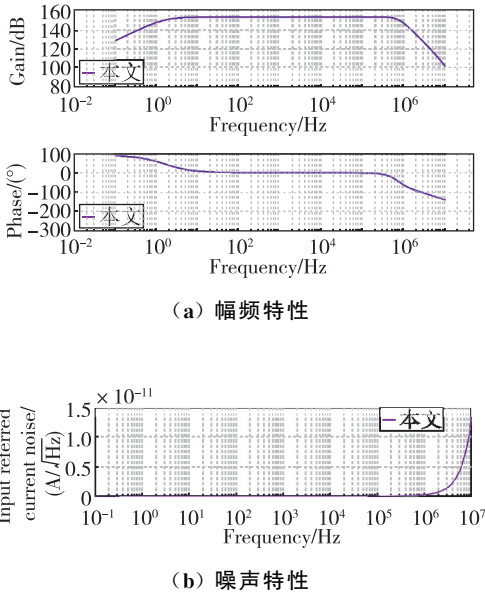


图 6 VBA 接口电路仿真

Fig. 6 Simulation of VBA interface circuits

通过电路仿真验证可知,所提出的新型 VBA 接口电路实现了较低的相位误差和电流噪声,有效地解决了硅微加速度计前端放大接口电路中高增益与大带宽之间的制约问题。

3.2 电路实验验证

图 7(a)所示为新型 VBA 接口电路幅频响应测试, MEMS 传感器件由 0.5pF 的耦合电容代替,在不干扰输入节点直流偏置的情况下产生测试电流。图 8 所示为新型 VBA 接口电路频率响应测试,由测试结果可知,等效跨阻增益在 19.95kHz 处为 $152\text{dB}\Omega$,通带带宽为 $2\text{Hz}\sim 410\text{kHz}$ 。该电路的相位误差为 1.2° 。

噪声测量实验流程如图 7(b)所示,为了不引入谐振器所带来的机械热噪声,在新型接口电路输入节点添加 0.5pF 电容器,作为 MEMS 谐振器的虚拟负载。数据采集卡的采样频率设定为 500kHz ,足够满足整个加速度计测控系统带宽。图 9 所示为

输出电压噪声功率谱密度,在 19.95kHz 处的输出电压噪声为 $357\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$,所对应的等效输入电流噪声为 $8.9\text{fA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (除以等效跨阻增益 $40\text{M}\Omega$),略高于仿真的电流噪声。

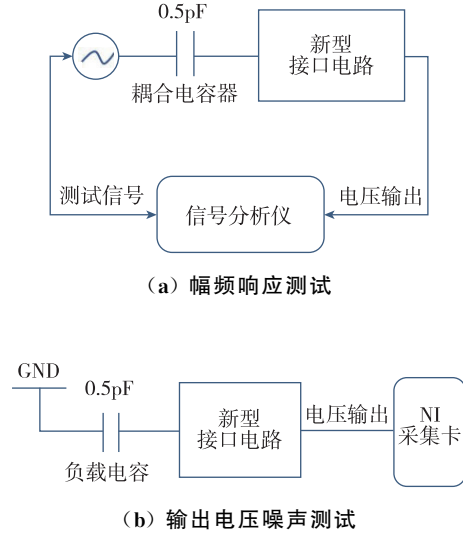


图 7 实验装置

Fig. 7 Laboratory field test equipment

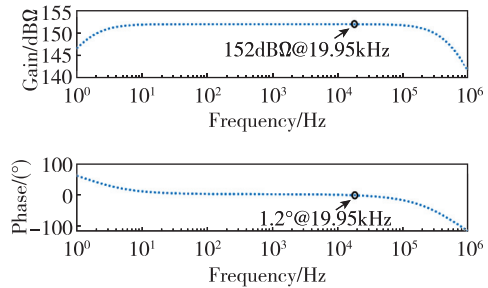


图 8 新型 VBA 接口电路频率响应测试

Fig. 8 Frequency response of the new VBA interface circuit

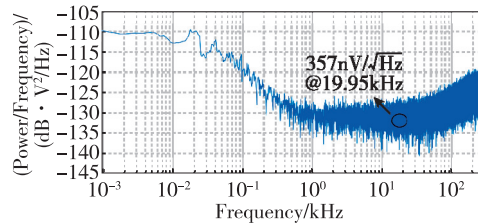


图 9 输出电压噪声功率谱

Fig. 9 Power spectrum of output voltage noise

表 3 总结了跨阻式接口电路以及本文研究的新 VBA 接口电路的最终实测性能,对比可知所研究的新 VBA 接口电路极大缓解了增益与带宽的制约问题,并且拥有极低的相位误差和电流噪声,

表 3 跨阻式接口电路实测性能对比

Tab. 3 Measured performance comparison of transimpedance interface circuit

| 接口电路类型 | 两级跨阻式 ^[12] | T 型跨阻式 ^[13] | 电容反馈式 ^[14] | 带通跨阻式 ^[15] | 本文 |
|----------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 应用背景 | MEMS 振荡器 | MEMS 陀螺 | MEMS 振荡器 | MEMS 陀螺 | MEMS 加速度计 |
| 增益 | 316k Ω | 1.6M Ω | 56M Ω | 45M Ω | 40M Ω |
| 带宽 | 2.5GHz | 230kHz | 1.8MHz | 350kHz | 410kHz |
| 相位误差 | — | 3.9° | 3.5°~10° | <2.5° | 1.2° |
| 等效输入电流噪声 | 2.5pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | 88fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | 65fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | 6.6 fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ | 8.9fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ |
| 输出类型 | 速度 | 速度 | 速度 | 位移、速度 | 位移、速度 |

为 MEMS 惯性器件前端放大接口电路提供了一种新的设计思路。

3.3 VBA 性能测试

零偏不稳定性是衡量加速度性能的重要指标,其受到前端放大接口电路的直接影响。在上电 30min 后,分别使用教研室传统一级跨阻接口电路与新型 VBA 接口电路搭配表头进行 1h 零偏测试,图 10 所示为现场测试图。在上电稳定后 1h 内,如图 11 所示,使用传统一级跨阻接口电路的零偏不稳定性为 2.274 μg ,而使用新型 VBA 接口电路测出的零偏不稳定性为 1.156 μg 。相较于传统一级跨阻接口电路,新型接口电路使得加速度计零偏不稳定性减小了 49.2%,这显示了新型 VBA 接口电路在

性能提升方面的巨大优势,通过接口电路的设计优化,将 VBA 的零偏不稳定性提升了 1 倍。

4 结论

本文针对振梁式加速度计输出电流信号较为微弱、易受噪声影响的特点,开展了一种可实现增益、带宽独立调控的低噪声接口电路设计。该新型 VBA 接口电路克服了现有前端放大电路增益与带宽相互制约的问题,并实现了极低的相位误差和输入电流噪声。经测试表明,该新型 VBA 接口电路在加速度计工作频率点(19.95kHz)处,在等效跨阻增益为 40M Ω 的前提下,实现了通带带宽为 2Hz~410kHz,相位误差为 1.2°,等效输入电流噪声为 8.9fA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。基于该设计的实验样机,在上电稳定后 1h 零偏不稳定性达 1.156 μg ,相较于实验室传统一级跨阻接口电路的实验样机,零偏不稳定性性能提升了近 1 倍。该电路的理论设计及实验验证为其他 MEMS 惯性器件前端放大接口电路提供了新的设计思路。

参考文献

- [1] Zhao P, Zhou Y. Active vibration control of flexible-joint manipulators using accelerometers[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2019, 47(1): 33-44.
- [2] Chen W, Wang M, Wu Z. Augmented reality game control of handy devices using a three-axis accelerometer and an electronic compass[J]. Sensors and Materials, 2017, 29(6): 727-739.
- [3] Serri M, Saeedi S. Design of a comparator-based silicon oscillating accelerometer with a comprehensive MEMS model[C]// Proceedings of 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), 2019: 125-129.
- [4] 郑辛, 刘飞, 雷明. 微小型惯性仪表发展现状、趋势以及对行业的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2021,

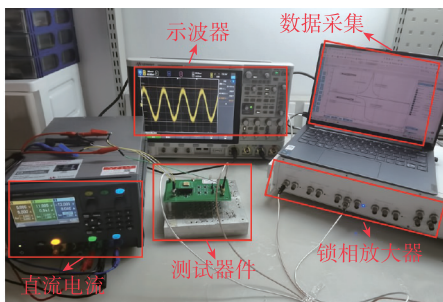


图 10 现场测试图

Fig. 10 Scene of field experiment

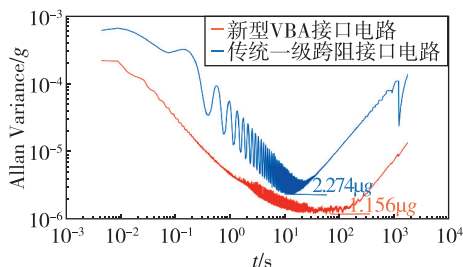


图 11 零偏不稳定性对比图

Fig. 11 Comparison of zero bias instability

- 29(6): 701-708.
- Zheng Xin, Liu Fei, Lei Ming. Development status, trend and impact on the industry of micro-small inertial instruments[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021, 29(6): 701-708(in Chinese).
- [5] Zhao C, Pandit M, Sobreviela G, et al. JMEMS letters a resonant MEMS accelerometer with 56ng bias stability and $98\text{ng}/\text{Hz}^{1/2}$ noise floor[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2019, 28(3): 324-326.
- [6] Xiong X, Zou X, Wang Z, et al. Using electrostatic spring softening effect to enhance sensitivity of MEMS resonant accelerometers[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(5): 5819-5827.
- [7] Li X, Hu J, Liu X. A high-performance digital interface circuit for a high-Q micro-electromechanical system accelerometer[J]. Micromachines, 2018, 9(12): 675.
- [8] Wu J, Fedder G K, Carley L R. A low-noise low-offset capacitive sensing amplifier for a $50\text{-}\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ monolithic CMOS MEMS accelerometer[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2004, 39(5): 722-730.
- [9] Roessig T A. Integrated MEMS tuning fork oscillators for sensor applications[D]. University of California, Berkeley, 1998.
- [10] 张晶. 硅微谐振式加速度计温度耦合非线性问题研究与敏感结构的优化设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- Zhang Jing. The nonlinear dynamics combined with temperature research and optimal design on sensitive structure of silicon micro resonant accelerometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2019(in Chinese).
- [11] Geen J A, Sherman S J, Chang J F, et al. Single-chip surface micromachined integrated gyroscope with $50^\circ/\text{h}$ Allan deviation[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2002, 37(12): 1860-1866.
- [12] Comi C, Corigliano A, Langfelder G, et al. A resonant microaccelerometer with high sensitivity operating in an oscillating circuit[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2010, 19(5): 1140-1152.
- [13] Sharma A, Zaman M F, Ayazi F. A 104-dB dynamic range transimpedance-based CMOS ASIC for tuning fork microgyroscopes[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2007, 42(8): 1790-1802.
- [14] Salvia J, Lajevardi P, Hekmat M, et al. A $56\text{ M}\Omega$ CMOS TIA for MEMS applications[C]// Proceedings of IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). IEEE, 2009: 199-202.
- [15] Zhao Y, Zhao J, Wang X, et al. A sub- μg bias-instability MEMS oscillating accelerometer with an ultra-low-noise read-out circuit in CMOS[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(9): 2113-2126.

(编辑:孟彬)