

电容式 MEMS 传感器的闭环信号调理电路设计与实现

张岩¹, 张海峰^{1,2}, 张文博¹, 尹亮^{1,2}, 岳亚丹³

(1 哈尔滨工业大学 MEMS 系统中心 哈尔滨 150001;

2 教育部微系统与微结构制造重点实验室 哈尔滨 150001;

3 国家水声对抗技术重点实验室 上海 201108)

摘要: 海洋资源开发与安全监测需求日益增长, 这对水下探测和定位的精确性和效率提出了更高要求。传统水下地声探测设备因体积庞大、部署困难等问题已难以满足现代海洋观测需求。针对高精度、小型化水下地声探测的技术需求, 本研究提出基于微机电系统 (MEMS) 技术的地震波传感器设计方法。通过构建敏感结构的二阶动力学模型, 结合 $\Sigma\Delta$ 调制器实现全集成闭环系统控制, 采用 Simulink 平台完成行为级建模与非理想特性仿真优化, 并通过 $0.5\ \mu\text{m}$ CMOS 工艺实现芯片集成, 芯片有效面积为 $7.8\ \text{mm}^2$ 。本文设计了全差分前级电荷放大器、相关双采样电路。测试结果表明: 传感器灵敏度达 $1.5\ \text{V/g}$, 工作带宽 $300\ \text{Hz}$, $1\ \text{Hz}$ 带宽下动态范围约为 $136\ \text{dB}$, 等效输入噪声低至 $154\ \text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$, 非线性度为 0.065% , 偏置稳定性约为 $28.2\ \mu\text{g}$, FOM 值为 $204.5\ \mu\text{W}\cdot\mu\text{g}/\text{Hz}$ 。本文最后验证了 MEMS 技术在水下地声探测领域的高精度应用潜力, 这为地震监测与海洋环境感知提供了小型化解决方案。

关键词: MEMS 技术; 地震波传感器; $\Sigma\Delta$ 调制器; 闭环控制; 高精度

中图分类号: V556.1; TN953

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)06-0161-10

DOI: 10.12347/j.ycyk.20250709003

CSTR: 32406.14.ycyk.20250709003

引用格式: 张岩, 张海峰, 张文博, 等. 电容式 MEMS 传感器的闭环信号调理电路设计与实现[J]. 遥测遥控, 2025, 46(6): 161–170.

Design and Implementation of Closed-Loop Signal Conditioning Circuit for Capacitive MEMS Sensors

ZHANG Yan¹, ZHANG Haifeng^{1,2}, ZHANG Wenbo¹, YIN Liang^{1,2}, YUE Yadan³

(1. MEMS Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

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

3. National Key Laboratory of Science and Technology on Underwater Acoustic Antagonizing, Shanghai 201108, China)

Abstract: With the development of marine resources and the increasing demand for safety monitoring, the traditional underwater acoustic detection equipment has problems such as large size and difficult deployment. In order to meet the need of high precision underwater acoustic detection, a design method of seismic wave sensor based on micro-electro-mechanical system (MEMS) technology is proposed in this paper. By constructing the second-order dynamic model of the sensitive structure, the fully integrated closed-loop system control is realized by combining the $\Sigma\Delta$ modulator, and the behavior level modeling and non-ideal characteristic simulation optimization are completed by Simulink platform, and the chip integration is realized by $0.5\ \mu\text{m}$ CMOS process. A fully differential precharge amplifier and a correlation double sampling circuit are designed. The test results show that the sensor sensitivity is up to $1.5\ \text{V/g}$, the operating bandwidth is $300\ \text{Hz}$, the dynamic range is about $136\ \text{dB}$ at $1\ \text{Hz}$ bandwidth, the equivalent input noise is as low as $154\ \text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$, the nonlinearity is 0.065% , and the bias stability is about $28.2\ \mu\text{g}$. The FOM value is $204.5\ \mu\text{W}\cdot\mu\text{g}/\text{Hz}$. The high-precision application potential of MEMS technology in the field of underwater acoustic detection is verified, and a miniaturized solution for seismic monitoring and marine environment perception is provided.

Keywords: MEMS technology; Seismic wave sensor; Sigma-delta modulator; Closed-loop control; High-precision

基金项目: 国家水声对抗技术重点实验室开放基金 (JCKY2024207CH08); 黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目 (2023ZXJ03C02); 哈尔滨市科技创新人才项目 (2023CXRCGD031)

收稿日期: 2025-07-09; 修回日期: 2025-07-21

Citation: ZHANG Yan, ZHANG Haifeng, ZHANG Wenbo, et al. Design and Implementation of Closed-Loop Signal Conditioning Circuit for Capacitive MEMS Sensors[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(6): 161-170.

0 引言

海洋经济作为新质生产力的重要增长点, 其战略性新兴产业对国民经济贡献率呈持续提升态势, 已成为推动经济高质量发展的重要引擎^[1]。如何通过创新的技术方案来提升水下探测与定位的精确性和效率, 是海洋技术飞速发展的当前阶段所面临的核心挑战之一^[2,3]。在海洋中声波远距离传播性能最佳, 因而水声成为海洋中信息传播的主要载体^[4]。海洋地声传感器需平衡灵敏度、动态范围、可靠性与成本, 并通过阵列化部署提升信号空间分辨能力, 为资源勘探、环境监测及灾害预警提供高保真数据基础^[5]。传统水下地声探测技术多依赖大型监测仪器, 例如宽频带地震仪。这些仪器具有采样信号频带宽、动态范围广及采样精度高的特点^[6]。这些高端设备在精确度和灵敏度方面具有显著优势, 能够捕捉到微弱的地声信号, 但是体积庞大, 难以成阵部署, 成本高昂, 对环境适应性不足^[7]。研究者们迫切需要寻找更为灵活、经济且高效的地声监测解决方案。

近年来, 水下地声检测技术中的地震波传感器逐渐受到关注。2011年, 刘晓为等人, 完成了一种单环四阶 $\Sigma\Delta$ 微加速度计的分析与设计。测试结果表明: 该加速度计灵敏度为 1.2 V/g, 非线性度为 0.2%, 整体功耗为 40 mW^[8]。2024年, 由陈灵佳完成的一项设计, 介绍了一种基于五阶 $\Sigma\Delta$ 调制器的微机械加速度传感器的闭环控制架构。根据系统仿真数据, 当输入信号为 1 g 幅值、256 Hz 频率的加速度时, 该系统在 1 024 Hz 的带宽下, 实现了 122.9 dB 的信噪比和 20.12 位的有效精度^[9]。2025年, 蔡俊成等人提出基于开关电容调制技术的闭环接口 ASIC(Application-Specific Integrated Circuit, 专用集成电路)。测试结果显示: 灵敏度 1.65 V/g, 带宽 300 Hz, 非线性度 0.15%, 偏置稳定性 36 μg ^[10]的 MEMS 传感器具有其体积小、精度高和易于布阵的优点, 这为水下探测提供了新的思路。该传感器不仅可以在相对狭小的空间中灵活部署, 而且在各种环境中均可保持高分辨率的探测能力, 使得及时监测和响应成为可能。这也使得 MEMS 传感器在城市^[11]、山区^[12]、航空^[13]以及

海洋^[14]等多种复杂环境中都能得到有效应用, 满足不同研究和监测需求。

因此, 本文意在通过研究电容式 MEMS 传感器的闭环信号调理电路, 设计出一种体积小、高灵敏度、高精度的 MEMS 地震波传感器。这种传感器使用最新的材料科学和微加工技术, 其性能得到优化, 这样可确保其在实际应用中有效捕捉地震波信号。通过提高传感器的灵敏度和精度, 能够更好地监测地震活动, 为地震预警系统提供更加可靠的数据支持, 为国家安全提供有力保障。

1 电容式 MEMS 加速度传感器的检测原理

敏感结构的设计与实现是 MEMS 传感器制造工艺的核心环节。这种结构的关键组成部分, 即敏感负载块、悬臂梁以及固定板, 其工艺设计尤为重要。传感器敏感结构等效图及其等效半桥模型如图 1 所示。

图(a)为敏感单元等效图、图(b)为敏感结构等效图、图(c)为敏感结构等效半桥模型。如图(a)所示, 当有外界作用力作用在负载块时, 阻尼力 F_b 和弹性力 F_m 将会对负载块产生相对位移 x 。该传感器可视为一个将加速度转换为相对位移的单自由度二阶系统。其动力学行为遵循牛顿第二定律^[15], 并由一个包含质量 m 、弹性系数 k 和阻尼系数 b 的微分方程来定义。其中, 相对位移 x 是传感器整体位移 y 与其内部负载块位移 z 的差值($x=y-z$), 有如下表示:

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} + b \frac{d(y-z)}{dt} + k(y-z) = 0 \quad (1)$$

将 $x=y-z$ 代入上式:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = m \frac{d^2 z}{dt^2} = ma \quad (2)$$

对动力学方程(2)在频域内进行分析, 通过拉普拉斯变换可以建立起表征加速度到位移转换特性的传递函数:

$$H_m(s) = \frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}} = \frac{1}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2} \quad (3)$$

式中, $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$, 为固有机机械谐振频率; $\varepsilon =$

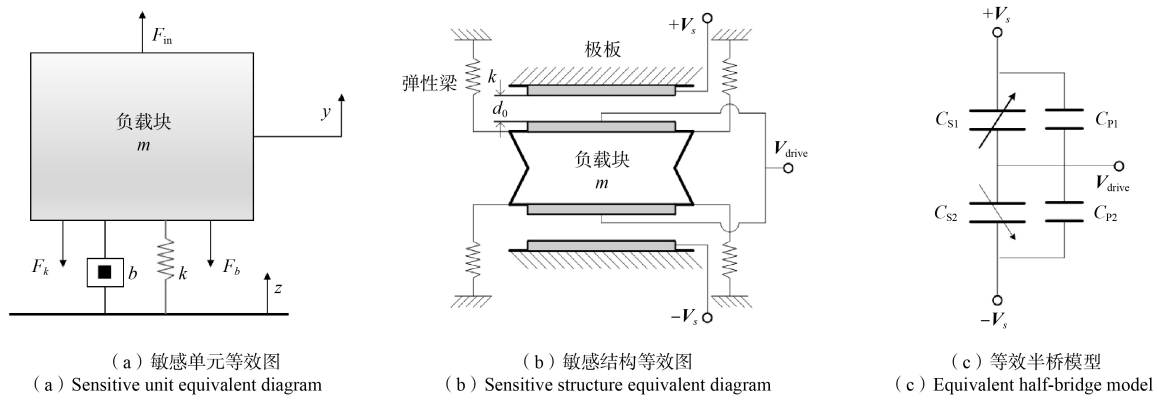


图1 传感器敏感结构等效图及其等效半桥模型

Fig. 1 Mechanical structure equivalent diagram of sensor and equivalent half-bridge model

$\frac{b}{2\sqrt{mk}}$, 为阻尼比因子。根据式(3), 可计算出敏感结构的灵敏度, 该参数表征了惯性质量块对单位输入加速度所产生的位移量, 即 $\left| \frac{X(\omega)}{a(\omega)} \right|$ 。

$$\left| \frac{X(\omega)}{a(\omega)} \right| = \begin{cases} \frac{1}{\omega_0^2} & \omega \ll \omega_0 \\ \frac{Q}{\omega_0^2} & \omega \approx \omega_0 \\ \frac{1}{\omega^2} & \omega \gg \omega_0 \end{cases} \quad (4)$$

在远低于谐振频率的频带内, 输入加速度与质量块位移线性相关, 此时灵敏度与谐振频率的平方成反比。利用此线性特性, 通过检测位移即可测量加速度, 而超出该频带关系则转为非线性。此外, 传感器的电容检测部分由图(b)所示的固定极板与活动质量块构成, 它们之间形成了 C_{S1} 和 C_{S2} 两个可变电容, 同时存在图(c)所示的寄生电容 C_{P1} 和 C_{P2} 。当外部加速度引起质量块位移时, C_{S1} 和 C_{S2} 的电容值会发生改变。后续电路通过检测这一电容变化, 便可实现对外部加速度的测量。

2 传感器信号调理电路系统设计

微机械加速度计是一种备受业界推崇的惯性传感器, 其低成本、小尺寸和轻质量的特点使其能够广泛应用于军事及民用系统中^[16,17]。通过在加速度传感器中融合 $\Sigma\Delta$ 调制技术, 可以直接获取高分辨率的数字信号, 这类传感器系统也被定义为 $\Sigma\Delta$ 微机械电学调制器^[18]。

2.1 $\Sigma\Delta$ 微机械加速度传感器调理电路结构

$\Sigma\Delta$ 微机械加速度传感器的系统架构主要包括单环与级联(MASH)两类拓扑结构, 其中高性能系统多采用单环架构^[19]。单环结构因无需量化噪声匹配设计而具有系统复杂度低、位流输出精度易优化等优势。级联结构的性能高度依赖于工艺匹配度, 一旦参数出现偏差便会产生噪声泄漏, 从而显著降低传感器的输出精度和综合表现^[20]。凭借优越的噪声整形效果, 高阶单环路设计已成为主流选择。针对高阶单环结构潜在的稳定性风险, 可通过优化系统参数及进行相位补偿来加以抑制^[21]。考虑到地声监测的严苛性能需求, 本文采用高阶单环结构。该架构在低噪声电路和真空封装的支持下, 可实现高动态范围和低于 $200 \text{ ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的噪声基底, 从而满足微弱信号的探测任务。

为了验证上文 $\Sigma\Delta$ 微机械加速度传感器系统结构的有效性, 在仿真软件上搭建 Simulink 模型进行行为级仿真, 如图2所示。

该系统的分析模型如图2所示, 其中包含了几个关键部分。首先, 系统的两个关键参数分别是: 表征位移-电压转换效率的增益 $K_{s/V}$, 以及用于调整系统稳定性的相位补偿系数 H_{aa} 。补偿器之后, 是一个由两个延迟型和一个非延迟型积分器组成的三阶环路滤波器。该滤波器的特性由前馈系数 f_{a1} 、 f_{a2} 和 f_{a3} 、反馈系数 f_{b1} 、 f_{b2} 和 f_{b3} 和积分器增益 k_1 、 k_2 和 k_3 共同决定。

在反馈路径中, $K_{V/a}$ 负责将反馈电压转换为等效加速度。模型中考虑的主要噪声源包括: 机械布朗噪声、前级放大器电学噪声和后续量化噪声。该加速度传感器系统的信号传递函数(STF)和噪声传递函数(NTF)可以写成:

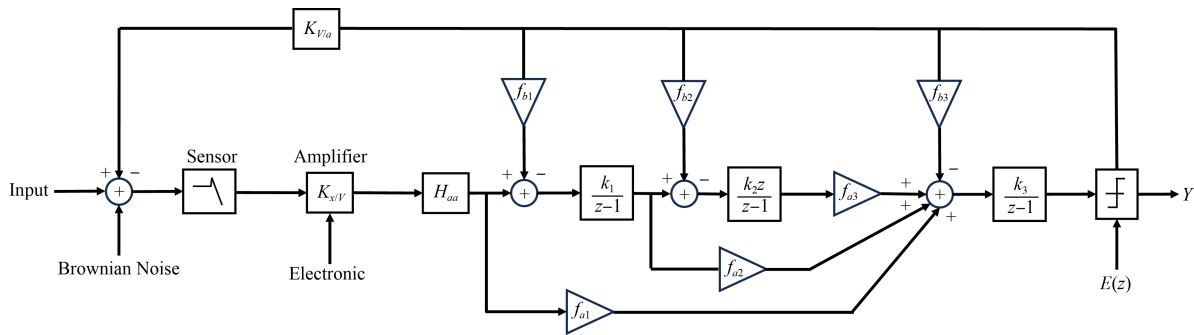


图 2 高阶 $\Sigma\Delta$ 微机械加速度传感器电路系统的 Simulink 模型

Fig. 2 Simulink model of high order $\Sigma\Delta$ micromechanical acceleration sensor circuit system

$$STF(z) = H_{ms}(z)K_{x/V}H_{aa}(z)(f_{a1}k_3I_1 + f_{a2}k_1k_3I_1^2 + f_{a3}k_1k_2k_3I_1^2I_2) \times [1 + H_{ms}(z)K_{x/V}H_{aa}(z)K_{V/a}k_3I_1 \times (f_{a1} + f_{a2}k_1I_1 + f_{a3}k_1k_2I_1I_2) + k_3I_1(f_{b1}f_{a2}k_1I_1 + f_{b1}f_{a3}k_1k_2I_1I_2 + f_{b2}f_{a3}k_2I_2 + f_{b3})]^{-1} \quad (5)$$

$$NTF(z) = [1 + H_{ms}(z)K_{x/V}H_{aa}(z)K_{V/a}k_3I_1 \times (f_{a1} + f_{a2}k_1I_1 + f_{a3}k_1k_2I_1I_2) + k_3I_1(f_{b1}f_{a2}k_1I_1 + f_{b1}f_{a3}k_1k_2I_1I_2 + f_{b2}f_{a3}k_2I_2 + f_{b3})]^{-1} \quad (6)$$

上式中, H_{ms} 为系统的离散域传递函数; 系统中各系数的具体取值设定如下: f_{a1} 、 f_{a2} 和 f_{a3} 为前馈系数, 分别取值 0.5, 0.3, 0.2; k_1 、 k_2 和 k_3 为积分器增益系数, 分别取值 1/2, 1/3, 1/2; f_{b1} 、 f_{b2} 和 f_{b3} 为反馈系数, 分别取值 0.2, 0.3, 0.5。此外, 滤波器采用了延迟型积分器 I_1 和非延迟型积分器 I_2 两种, 它们的数学表达式如下:

$$I_1 = \frac{1}{z-1} \quad I_2 = \frac{z}{z-1} \quad (7)$$

在图 2 的分析模型中, 描述敏感结构输出位移与电荷放大器输出电压之间关系的放大系数 $K_{x/V}$, 可由下式给出:

$$K_{x/V} = \frac{C_{int}d}{4C_0V_r} \quad (8)$$

其中, C_{int} 是积分电容, V_r 是参考电压。 $\Sigma\Delta$ 微机械加速度传感器的反馈电压 V_b 对敏感结构产生静电反馈力。通过施加静电反馈力, 可将质量块的平均位置维持在其标称点, 以此避免模拟闭环电路中可能发生的拉合失效问题^[22]。反馈电压到等效加速度的增益系数 $K_{V/a}$ 表示如式(9)所示。前置相位补偿器的信号传递函数 z 域表达式如式(10)所示, 补偿系数 α 的大小决定了系统的补偿深度, 此处补偿系数选择 0.9。

$$K_{V/a} = \frac{F}{V_b m} = \frac{\epsilon A}{4V_b m} \left[\frac{(V_{fb} + V_s)^2}{(d+x)^2} - \frac{(V_{fb} - V_s)^2}{(d-x)^2} \right] \quad (9)$$

$$H_{aa}(z) = 1 - \alpha z^{-1} \quad (10)$$

2.2 行为级建模和分析

在 Simulink 中搭建传感器的非理想行为级模

型, 如图 3 所示, 该模型考虑了时钟抖动、各类噪声以及运放的非理想参数(65 dB 增益, 20 MHz 带宽, 20 V/ μ s 摆率)。为抑制时钟馈通, 模型采用了分时反馈技术, 并将相位补偿系数定为 0.9。经蒙特卡罗仿真优化, 确定采样频率为 250 kHz、前馈增益 k_f 为 0.4 时, 系统在 300 Hz 带宽内噪声抑制提升 53.6 dB。仿真与实测误差小于 8%, 证明了该参数优化策略的有效性及其作为理论预测工具的价值。

系统在 250 kHz 采样率下输入 1 g 正弦信号, 图 4 输出功率谱显示低频噪声低于 -130 dBV, 被成功整形, 验证了系统功能。根据 1.5 V/g 灵敏度估算, 等效输入加速度噪声约为 154 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。由于该噪声基底主要受前级电路限制, 而非高阶整形后的量化噪声, 所以优化前级电路是提升精度的核心。

3 主要电路设计与实现

图 5 展示了本文研究的电容式闭环微机械 $\Sigma\Delta$ 加速度传感器的系统结构。在统一时钟驱动下, 系统集成机械敏感单元、前级处理电路(含低噪声放大、采样保持及相位补偿)和一个 $\Sigma\Delta$ 调制环路(含积分器、比较器、1 位 DAC)等多个核心模块。

3.1 前级敏感电路

组成全差分前级敏感电路的单元有: 等效机械结构、180 pF 的参考电容对、电荷敏感单元、相关双采样保持模块、压控电流源 I_b 、电流源 I_{ext} 、RLC 环路、流控电压源 V 及压控电容 C_{S1} 和 C_{S2} 。其

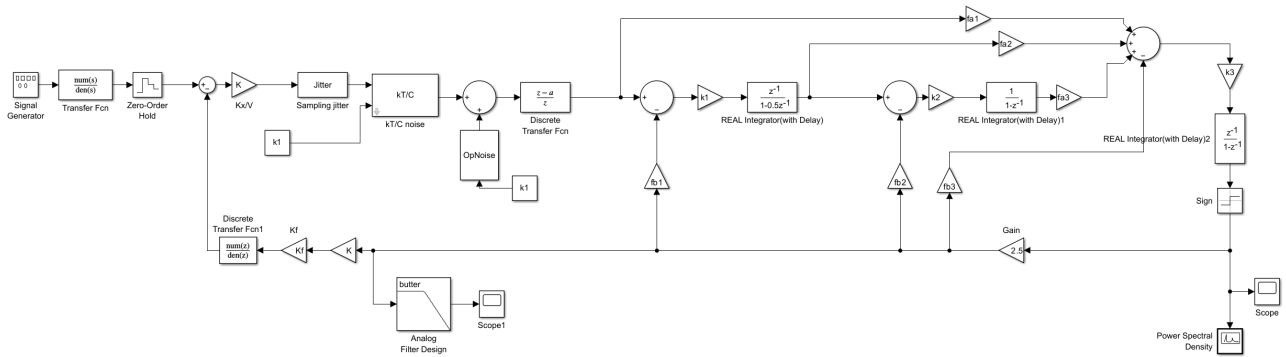


图 3 ΣΔ 微机械加速度计的非理想行为级建模与分析

Fig. 3 Non-ideal behavior modeling and analysis of ΣΔ micro-mechanical accelerometer at the circuit level

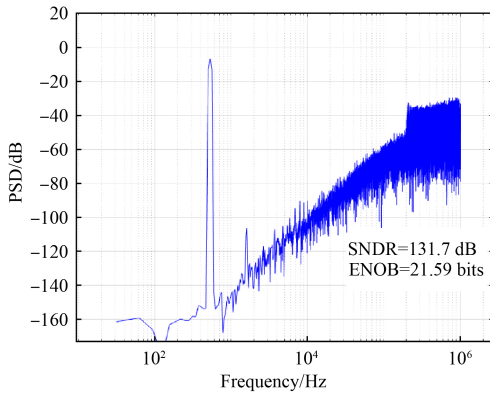


图 4 非理想行为模型的输出功率谱密度

Fig. 4 Output power spectral density of the non-ideal behavioral model

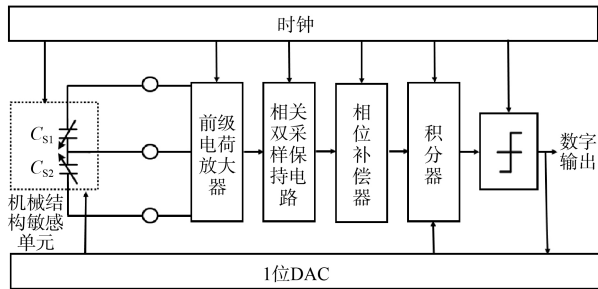


图 5 闭环 ΣΔ 微机械加速度传感器系统结构示意图

Fig. 5 Functional block diagram of the closed-loop ΣΔ accelerometer

电路原理如图 6(a)所示。本文采用差分开关电容技术进行检测，其核心是利用参考电容 CR 和正负参考电压驱动的全桥平衡电路。在该架构下，前级电荷敏感模块负责位移到电压的转换与放大，而后级 ΣΔ 调制器则进行模数转换。前级电荷放大敏感电路的输出电压可表示为特定形式：

$$V_{out} = \frac{2V_r \Delta C}{C_{int}} = \frac{4C_0 V_r}{C_{int} d\omega_0^2} a(f) \quad (11)$$

为提升性能，本文对电路的关键参数和时序进行了协同优化。在参数设计上，为兼顾环路稳定性与转换精度，将敏感结构静态电容补偿至 200~220 pF，积分电容选用 10 pF，并对运算放大器的带宽在“建立误差”和“噪声混叠”之间进行了权衡。如图 6(b)所示，在时序控制上，系统采用 250 kHz 的分时工作策略，通过将静电力反馈(占空比 50%)与电荷感应分配在不同相位，以时序隔离的方式有效抑制了噪声耦合，最终实现了高精度的传感与反馈控制。

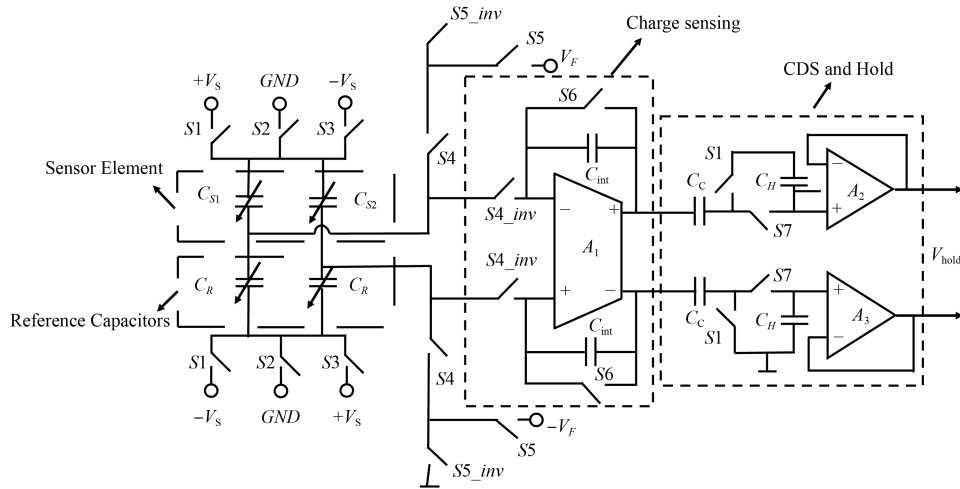
3.2 调制器电路

图 7 所示三阶调制器通过参数优化，在扩展动态范围的同时控制了积分器摆幅。其设计亮点包括：采用折叠式共源共栅运放并增大输入对管尺寸以抑制 1/f 噪声；通过分级缩放电容降低功耗。以及采用非对称开关时序消除 98% 以上的电荷注入误差。该电路在 250 kHz 时钟下稳定工作，其 1 bit 输出经由 DAC 反馈以维持质量块平衡。

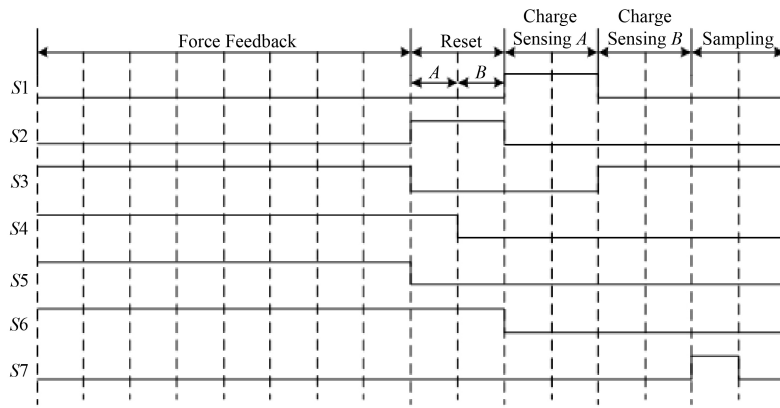
4 测试结果

加速度传感器测试系统如图 8 所示，测试中采用减震平台抑制环境振动对噪声特性的干扰。传感器相关信息如表 1 所示，电路主要参数如表 2 所示。

动态信号分析仪为安捷伦 35670A，测试系统的总功耗通过安捷伦 E3631 高精度电源在 7 V 稳定供电电压下，直接读取其消耗的静态电流计算得出，总功耗约为 23 mW。在实验室环境下通过 Agilent MSO9104A 示波器观测传感器闭环输出的 1 位数字码流。基于图 8 所搭建的测试系统，测试过程中，采用安捷伦 16804A 逻辑分析仪来采集



(a) 前端电荷感应电路示意图
(a) Schematic of the front-end charge-sensitive circuit



(b) 前级电路时序图
(b) Timing diagram of the front-end circuit

图 6 前级电路示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the preamplifier circuit

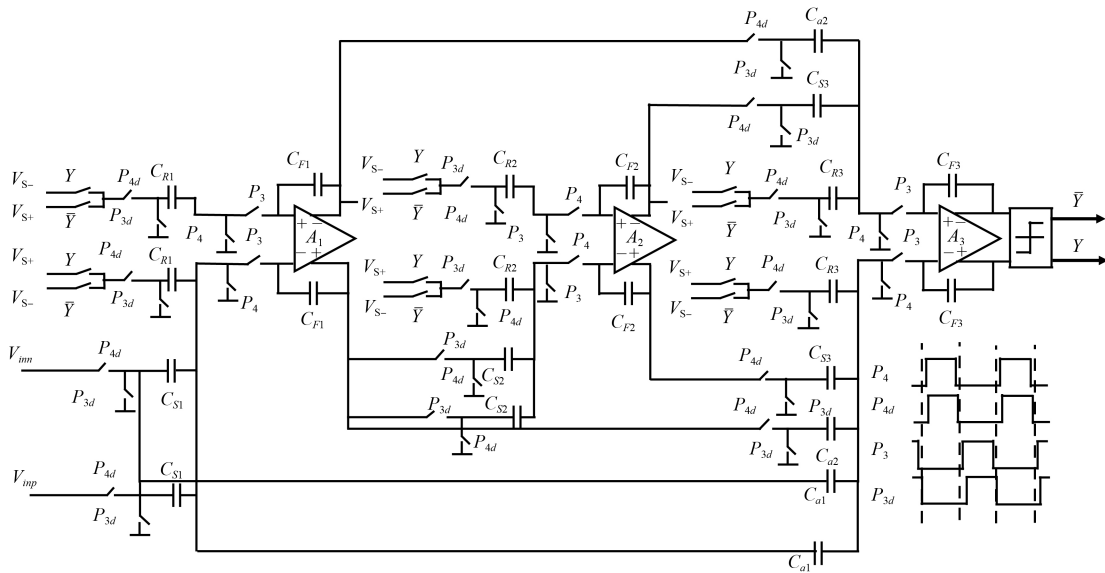


图 7 $\Sigma\Delta$ 调制器电路图

Fig. 7 $\Sigma\Delta$ modulator circuit

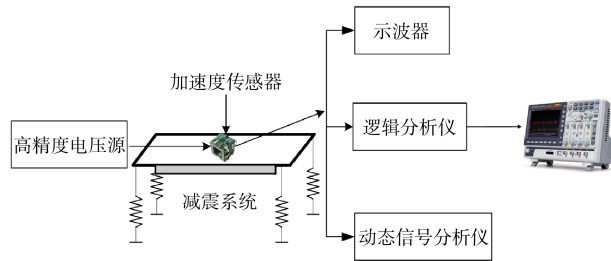


图 8 加速度传感器测试系统
Fig. 8 Accelerometer measurement system

表 1 传感器参数

Table 1 Sensor parameters

物理量	参数
灵敏度	10 pF/g
质量块质量(m)	62E-6 kg
静态电容(C_0)	180 pF
阻尼系数(b)	0.01 N/m/s
检测梳齿间距(d)	2 μ m
弹簧弹性系数(k)	2 760 N/m
谐振频率(ω_0)	1 000 Hz
品质因数(Q)	>40

表 2 电路主要参数

Table 2 Main parameters of the circuit

物理量	参数
静态电容(C_s)	360 pF
积分电容(C_i)	10 pF
载波源电压(V_s)	3.5V
系统采样频率(f_s)	250 kHz
带宽(f_{-3dB})	500 kHz
噪声电压谱密度(V_n)	10 nV/Hz ^{1/2}

并存储芯片输出的位流数据，并在去除冗余信息后进行分析。为了确保测试结果的准确性，测试环境不仅进行了减振处理，还实施了电磁屏蔽，以抑制外部电磁干扰。

本章测试结果直接验证了前述电路设计的有效性。在呈现具体数据前，有必要阐明测试中的数据处理方法。为准确评估芯片性能，我们用逻辑分析仪采集其 1bit 输出码流，并采用韦尔奇法 (Welch's method) 在软件中进行后处理以计算功率谱密度。需要强调的是，这种通过多点平均来降低频谱估计方差的方法，是动态信号分析中的标准技术。其目的在于从充满随机性的有限数据中，提取出被测对象确定性的、平均的噪声水平。它并不会改变或“美化”电路自身的物理噪声特性，

而是为了更准确地对其进行测量和表征。因此，该处理方法是保证验证结果有效性和可靠性的必要环节。

图 9 展示了本次设计的定制测试电路板以及加速度传感器的芯片版图。在物理实现上，机械敏感结构通过金属引线与芯片电学互连。整个系统由一台 Agilent E3631 电源提供电力，供电电压范围为 5 V~7 V。其中芯片有效面积为 7.8 mm²。

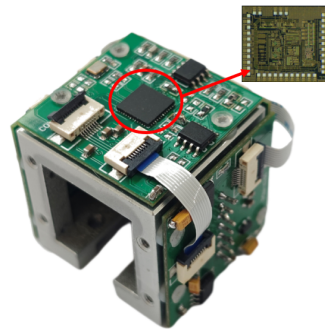


图 9 加速度传感器的专用测试板及其芯片布局图
Fig. 9 Customized test PCB and chip layout of the accelerometer

图 10 展示了 $\Sigma\Delta$ 加速度传感器输出信号经多点平均处理的频谱特性。结果表明：频谱平滑处理有效抑制了低频振动和高频毛刺等特定频段干扰，且噪声基底特征保持稳定。该方法在保留传感器本底噪声的基础上，显著提升信号抗干扰能力，为后续解调提供更清晰的频域分析基底。

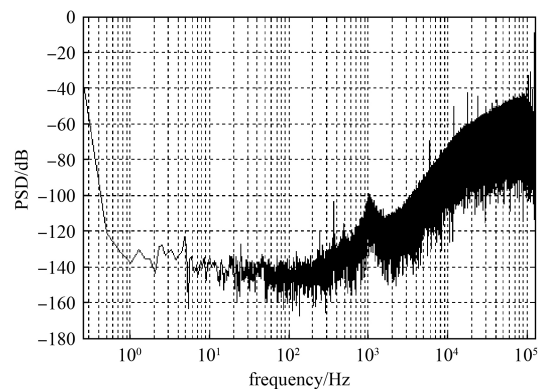


图 10 基于多点平均法的 $\Sigma\Delta$ 加速度计输出功率谱密度图
Fig. 10 Multi-point averaged output spectrum of the $\Sigma\Delta$ accelerometer

从图 10 中可读出，电压噪声基底约为 -133 dBV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。基于 1.5 V/g 的实测灵敏度，计算得到等效输入加速度噪声为 154 ng/ $\sqrt{\text{Hz}}$ 。该实测结

果验证了低噪声设计的有效性, 并为 FOM 值的计算提供了可靠依据。传感器的线性度通过静态标定实验进行评估: 使用高精度转台施加激励, 并通过 1 Hz 低通滤波和六位半精密电压表采集数据。结果显示, 系统具有良好的线性关系, 灵敏度为 1.5 V/g。实测与仿真灵敏度的偏差主要源于传感单元的参数不完整导致模型简化, 可通过构建更精确的模型来逼近理论值。

图 11 为传感器非线性测试结果图, 系统的非线性度主要受限于机械结构和前级电路, 测试结

果为 0.065%。考虑到仅机械结构自身的非线性度典型值便可达到 0.1%, 这表明系统的整体线性度表现良好^[23]。前级电路的非线性主要源于其跟随器单元的共模抑制限制。采用限带滤波与高精度测量相结合的标定方法, 有效排除了噪声干扰, 测得在 ±2 g 量程内非线性误差为 0.065%, 验证了系统的线性响应特性。同时, 受限于电源电压及运放的输出摆幅, 该传感器在 7 V 单电源供电条件下的输入量程为 ±1.2 g。基于此量程, 可以计算出系统在 1 Hz 带宽内的动态范围约为 136 dB。

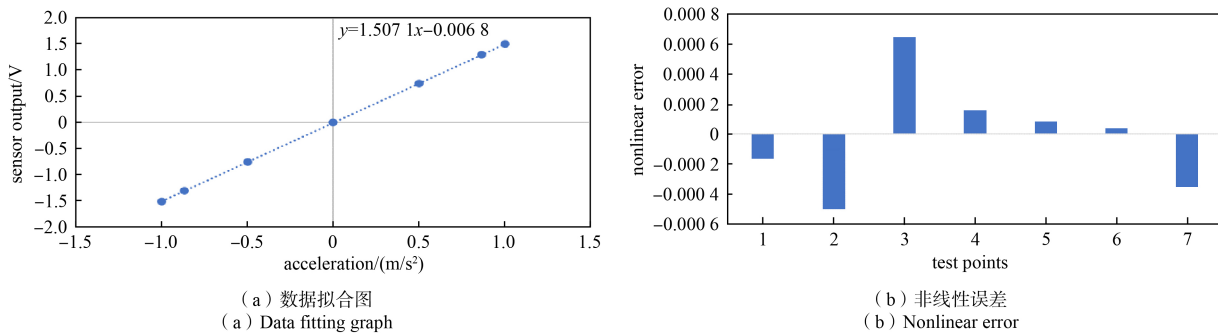


图 11 加速度传感器非线性测试结果

Fig. 11 Nonlinear test results of the acceleration sensor

在实验室环境下, 对处于零输入加速度状态的传感器输出进行数据采集。通过对超过 4 小时的采样数据进行艾伦方差分析, 我们测定了闭环 $\Sigma\Delta$ 加速度计的偏置稳定性。如图 12 所示, 其稳定性计算值为 28.2 μg 。本研究认为, 若加强该系统的电磁屏蔽和减震设计, 其稳定性表现会更佳。图中的嵌入部分为处理后的数据图。

以上测试结果整理如表 3 所示:

测试结果直接验证了前述电路设计的有效性。

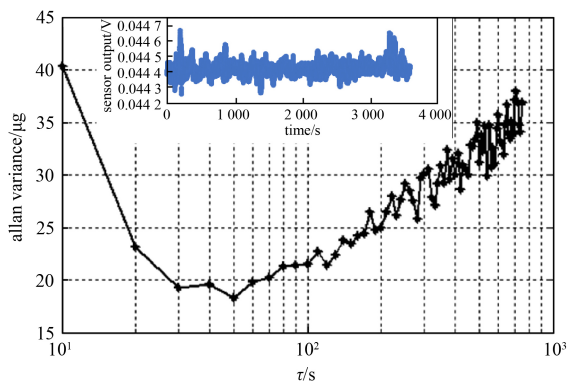


图 12 闭环 $\Sigma\Delta$ 加速度传感器的零偏稳定性分析图

Fig. 12 Closed-loop $\Sigma\Delta$ accelerometer: bias instability measurement

表 3 测试结果

Table 3 Test result

测试量	测试参数
灵敏度	1.5V/g
非线性度	0.065%
偏置稳定性	28.2 μg
等效输入噪声	154 $\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$
芯片有效面积	7.8 mm^2
动态范围	136 dB

如图 10 所示, 系统实现了 154 $\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的低噪声基底, 这主要得益于前级电路的全差分与相关双采样(CDS)等低噪声设计, 同时其标志性的噪声整形曲线也证明了 $\Sigma\Delta$ 调制器按预期工作。如图 11 所示, 0.065% 的高线性度则归功于闭环反馈与全差分架构对非线性误差的有效抑制。最终, 由低噪声基底和 7 V 供电电压下的输出摆幅共同决定的 136 dB 高动态范围, 综合验证了本设计在各项性能间的成功权衡。

为进行性能的量化对标, 本文采用了 FOM (Figure of Merit, 品质因数) 作为评价基准, 其表达式为:

$$FOM = \frac{Power \times Noise\ floor}{\sqrt{BW}} \quad (17)$$

其中Power是芯片的整体功耗，Noise floor是噪声基底，BW是信号的带宽。基于此，表4详细对比了本工作测得的关键性能指标与国外文献报道的先进性能指标。与现有文献报道的技术相比，本研究在性能上取得了显著的优势。

表4 本文和文献中的加速度传感器性能对比

Table 4 Comparison with previous works

参考文献	工艺	功耗	带宽	噪声基底	FOM值($\mu\text{W} \cdot \mu\text{g}/\text{Hz}$)
[24]	0.18 μm CMOS	147 μW	2 500 Hz	270 $\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$	793.80
[25]	0.35 μm CMOS	3 600 μW	200 Hz	2 $\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$	509.12
[26]	0.18 μm CMOS	139 μW	12 500 Hz	224 $\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$	278.49
本文	0.50 μm CMOS	23 000 μW	300 Hz	0.154 $\mu\text{g}/\text{Hz}^{1/2}$	204.50

5 结束语

本研究将二阶动力学模型与三阶 $\Sigma\Delta$ 调制器融合于闭环控制架构，具有创新性。通过全集成芯片设计实现系统微型化，攻克了传统地声传感设备因分立元件多、电路冗余导致的体积大与部署难的技术难题。本研究采用Simulink行为级建模和非理想特性优化策略，结合0.5 μm CMOS工艺实现了全差分电荷放大器与调制器电路，其中芯片有效面积为7.8 mm^2 。实验结果表明：在7 V电源电压供电时，该传感器在300 Hz工作带宽内达到1.5 V/g灵敏度、154 $\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 等效输入噪声及0.065%非线性度，1 Hz带宽下动态范围约为136 dB，偏置稳定性为约28.2 μg 。

为客观评估其技术水平，我们通过标准化的品质因数(FOM)与近年先进成果进行了对标分析。如表2所示，本文的加速度传感器综合FOM值为204.5 ($\mu\text{W} \cdot \mu\text{g}/\text{Hz}$)，较已发表的高性能加速度传感器更优。本设计综合性能优越，验证了所采用技术路线的先进性。该成果不仅验证了MEMS技术在水声探测领域的高精度应用可行性，其小型化设计更突破了传统地震监测设备的物理限制，为海洋资源勘探、水下安全监测提供了新型解决方案，具有重要的工程应用价值与市场推广潜力。

参考文献

[1] 张涛, 王奕丹. 海洋科技创新驱动下的海洋新质生产力发展路径[J]. 环境保护, 2025, 53(3): 12-16.

从表4的对比可看出，本工作的功耗指标高于其他文献，这是为实现极致性能而有意进行设计权衡的结果。为达到154 $\text{ng}/\sqrt{\text{Hz}}$ 的超低噪声指标，我们采用的0.5 μm CMOS工艺及高增益电路需工作在较高静态电流下，因此功耗高于采用更先进工艺的对比文献。未来工作可在采用先进工艺的基础上进一步优化该指标。

ZHANG Tao, WANG Yidan. The development path for marine new quality productivity driven by marine technology innovation[J]. Environmental Protection, 2025, 53(3): 12-16.

- [2] 张景全, 于宗耀. 人工智能军事化与海洋安全: 风险与应对[J]. 国际论坛, 2024, 26(4): 27-47, 155-156.
- [3] 刘新华. 海洋安全治理面临的挑战与中国的应对之道[J]. 社会主义研究, 2024(3): 145-152.
- [4] 吕钱浩. 矢量传感器阵列技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2004: 21-35.
- [5] MCCONNELL J A, RORICK T P. Review of directional sensors for low frequency underwater acoustic applications[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2018, 144(3_Supplement): 1945-1945.
- [6] 包雪, 叶放, 张晗, 等. 宽频带地震仪性能现场检测方法进展研究[J]. 地球物理学进展, 2023, 38(4): 1739-1756.
- BAO Xue, YE Fang, ZHANG Han, et al. Research on the progress of in-site testing methods for broadband seismograph performance[J]. Progress in Geophysics, 2023, 38(4): 1739-1756.
- [7] LINDSEY N J, MARTIN E R. Fiber-optic seismology[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2021, 49(1): 309-336.
- [8] 刘晓为, 刘云涛, 姜一鸣, 等. 四阶Sigma-Delta微加速度计系统设计与分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(7): 38-41.
- LIU Xiaowei, LIU Yuntao, JIANG Yiming, et al. System level design and analysis of fourth-order sigma-delta micromachined accelerometer[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(7): 38-41.
- [9] 陈灵佳. 基于五阶 Δ 调制的微加速度计设计与仿真[J].

- 现代工业经济和信息化, 2024, 14(1): 147-154.
- [10] CAI J, CAI Y, LI X, et al. Design of interface ASIC with power-saving switches for capacitive accelerometers[J]. *Micromachines*, 2025, 16(1): 96.
- [11] 李玮健, 李强, 王志军. 基于嵌入式 MEMS 无线传感器的路面损伤监测技术研究[J]. *山东交通科技*, 2024(5): 66-71.
LI Weijian, LI Qiang, WANG Zhijun. Research on damage detection in pavement structures based on embedded MEMS wireless sensors[J]. *Shandong Transportation Science and Technology*, 2024(5): 66-71.
- [12] 吴迪, 梁泰铭, 吴静, 等. 基于 MEMS 传感器的滑坡监测算法设计与试验[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(6): 39-50.
WU Di, LIANG Taiming, WU Jing, et al. Design and experiment of landslide monitoring algorithm based on MEMS sensor[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(6): 39-50.
- [13] 韩金哲, 王德成, 程鹏, 等. MEMS 压力传感器在航空领域中的应用[J]. *机械工业标准化与质量*, 2024(7): 55-60.
- [14] 蔡薇. 基于 MEMS 传感器的遥测波浪系统关键技术研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2021.
- [15] COELHO R L. On the deduction of Newton's second law[J]. *Acta Mechanica*, 2018, 229(5): 2287-2290.
- [16] BOSER B E, HOWE R T. Surface micromachined accelerometers[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1996, 31(3): 366-375.
- [17] PERLMUTTER M, ROBIN L. High-performance, low cost inertial MEMS: A market in motion[C]//*IEEE/ION Position, Location, and Navigation Symposium*. Myrtle Beach: IEEE, 2012: 225-229.
- [18] KAJITA T, MOON U, TEMES G C. A noise-shaping accelerometer interface circuit for two-chip implementation[C]//*IEEE International Symposium on Circuits and Systems*. Geneva: IEEE, 2000: 337-340.
- [19] 徐宏林. 高精度 SIGMA-DELTA 微加速度计接口 ASIC 芯片研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [20] 任世华, 谢亚辰, 焦小森, 等. 煤炭开发过程碳排放特征及碳中和发展的技术途径[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(1): 60-68.
- REN Shihua, XIE Yachen, JIAO Xiaomiao, et al. Characteristics of carbon emissions during coal development and technical approaches for carbon neutral development [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 60-68.
- [21] XU H L, LIU H N, HE C, et al. A fully differential interface circuit of closed-loop accelerometer with force feedback linearization[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2014, 21(1): 18-23.
- [22] 才庆祥, 刘福明, 陈树召. 露天煤矿温室气体排放计算方法[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(1): 103-106.
CAI Qingxiang, LIU Fuming, CHEN Shuzhao. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coalmines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(1): 103-106.
- [23] 李军俊, 刘理天, 杨景铭. 新型硅微加速度传感器的设计与制作[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 1999, 39(S1): 84-87.
- [24] ZHONG L, LIU S, XU D, et al. Voltage control ratio-metric readout technique with improved dynamic range and power-efficiency for open-loop MEMS capacitive accelerometer[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2022, 69(12): 5085-5095.
- [25] YUCETAS M, PULKKINEN M, KALANTI A, et al. A high-resolution accelerometer with electrostatic damping and improved supply sensitivity[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2012, 47(7): 1721-1730.
- [26] ZHONG L, LIU S, XU D. Correlated double amplifying readout technique for low-noise power-efficient MEMS-capacitive accelerometer[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2022, 71: 1-11.
- [作者简介]
张 岩 2001 年生, 本科。
张海峰 1978 年生, 教授, 博士生导师。
张文博 1990 年生, 硕士, 助理研究员。
尹 亮 1977 年生, 副教授, 博士生导师。
岳亚丹 1997 年生, 硕士。

(本文编辑: 潘三英)