光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2024032702

基于 AD7124 的高精度 MEMS 加速度计信号处理系统

唐宇莎[1]，张　伟[1*]，郭子龙[2]

（1. 北京信息科技大学 传感器重点实验室，北京 100101；2. 西安工业大学 光电工程学院，西安 710021）

摘　要： 为降低加速度计存在的零点漂移对测量精度的影响，满足低量程微机械（MEMS）加速度计的测量精度和漂移需求，设计了一种基于 AD7124 的高精度 MEMS 加速度计信号处理系统。以 STM32F303CBT6 为核心控制器，驱动高精度模/数（A/D）转换芯片 AD7124 进行数据采集。设计脉冲宽度调制输出方波作为加速度计的激励信号，运用加权移动平均滤波对信号进行去噪和平滑，提出一种零点漂移抑制与跟踪的算法，解决了零点漂移过大的问题。测试结果表明，加速度计在±1 g 量程下的灵敏度为 146 mV/g，经过数字滤波后的加速度计输出稳定度提高了 5.97 倍，最终零偏稳定性由 45.850 mg/h 改善为 0.055 mg/h。

关键词： 微机械加速度计；AD7124；脉冲宽度调制；加权移动平均滤波；零点漂移

中图分类号： TP212；TN379　**文章编号：** 1001－5868(2024)05－0792－06

High-precision Micro-electro-mechanical System Accelerometer Signal Processing System Based on AD7124

TANG Yusha[1], ZHANG Wei[1], GUO Zilong[2]

(1. Key Laboratory of Sensor, Beijing Information and Technology University, Beijing 100101, CHN;
2. School of Opto-electronical Engineering, Xi'an Technology University, Xi'an 710021, CHN)

Abstract: To reduce the influence of the zero-drift problem on the measurement accuracy of an accelerometer and satisfy the measurement accuracy and drift requirements of a low-range micro-electro-mechanical system (MEMS) accelerometer, a high-precision MEMS accelerometer signal processing system based on AD7124 is designed. The hardware uses STM32F303CBT6 as the core controller to drive AD7124, and a high-precision analog-to-digital (A/D) conversion chip is used for data acquisition. In the software, the pulse width modulation (PWM) output square wave is designed as the excitation signal of the accelerometer, and the weighted moving average filter is used to denoise and smooth the signal. An algorithm for zero-drift suppression and tracking is proposed, which solves the problem of excessive zero-drift. After testing, the sensitivity of the accelerometer is 146 mV/g at the ±1 g range, the output stability of the accelerometer after digital filtering is increased by 5.97 times, and the final bias stability is improved from 45.850 mg/h to 0.055 mg/h.

Key words: MEMS accelerometers; AD7124; PWM; weighted moving average filtering; zero-drift

收稿日期：2024－03－27.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(61372016)；北京市教育委员会科技计划重点项目(KZ201711232030)；传感器北京市重点实验室开放课题基金资助项目(2022CGKF002).

* **通信作者：**张　伟

0　引言

微机械(MEMS)加速度计主要用来测量载体的加速度、倾斜度、振动的频率和幅度等参数。该加速度计采用了 MEMS 技术，可极大缩小器件尺寸，具有体积小、重量轻、成本低、功耗低、易于集成等优点[1-2]，广泛应用于地震测量[3]、航空航天[4]、惯性导航[5]、倾斜测井[6]和车辆控制[7]等领域。随着 MEMS 技术的快速发展[8]，高精度加速度传感器的市场需求日益增长，通过对加速度计的输出信号进行实时采集并减小误差来提高加速度计的输出精度变得尤为重要。

为进一步解决加速度计的零点漂移问题，提高加速度计的测量精度，本文设计了一种基于 AD7124 的高精度微机械加速度计信号处理系统，硬件部分包括微控制芯片 STM32F303CBT6、电容桥式电容电压转换电路、模/数转换芯片 AD7124 等。软件上设计脉冲宽度调制(PWM)输出方波作为加速度计的激励信号，运用加权移动平均滤波和零点漂移抑制与跟踪的算法，实现了载体加速度的精确测量，解决了零点漂移过大的问题。

1　系统总体设计

本文设计的 MEMS 加速度计系统总体框图如图 1 所示，加速度计的姿态变化引起敏感结构产生一个微弱的电容变化，电容变化量在激励信号的控制下转换为电荷变化量输出至电容电压转换电路，电容电压转换电路检测该电荷变化量，并将其转换为电压变化量以差分的形式输出，再对电压信号进行放大、滤波等处理，由 AD7124 进行采集并转换成数字信号，通过 SPI 传输至 STM32 进行数字信号处理，运用加权移动平均滤波对信号进行去噪和平滑，然后通过零点漂移抑制与跟踪算法消除零偏、零漂。在整个工作过程中，系统需要实时对检测到的信号以数字量的形式输出。

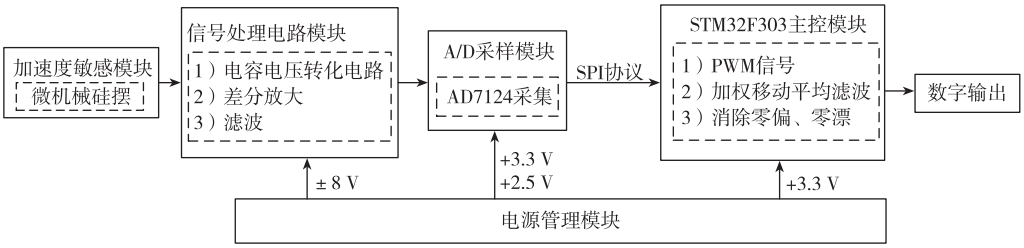


图 1　系统总体框图

2　加速度计敏感结构及工作原理

电容式加速度计因其制造简单且具有高灵敏度和高精度等优点，是目前工业界最为常用的一种微加速度计[9-10]。常见的电容式加速度计分为梳齿式、跷跷板摆式和三明治式三种结构[11]。本文以“三明治”结构的差分电容式加速度计为设计基础，如图 2 所示为敏感结构的三维图，主要由硅质量块、弹性支撑梁以及镀有钯银电极的陶瓷电极板组成，中间为硅敏感质量块，上下各置一个陶瓷电极板，质量块上的电极与上下陶瓷电极板形成差分电容。在外部加速度的作用下，中间的质量块向一侧移动，改变与上下电极板之间的间隙，上下电容一个增大，一个减小，形成差分电容，最终通过检测电容变化的大小来计算出输入加速度的大小。

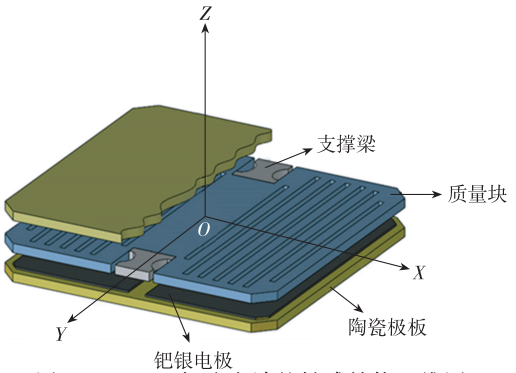


图 2　MEMS 加速度计的敏感结构三维图

3　系统硬件设计

3.1　电容电压转换电路

电容电压转换电路是连接加速度计敏感结构与信号调理电路的桥梁，其性能直接决定系统的检测精度和稳定性。图 3 为本文设计的一种灵敏度高、性噪比高的桥式电容检测接口电路，其中输入端提供一个激励信号 V_s，C_1 和 C_4，C_2 和 C_3 分别并联，通过二极管的截止和导通使电容器实现充放电过程，电路最后将电容变化量转换为电压变化量，以差

分的方式输出电压信号。当没有加速度作用时，四个可变电容器 C_1，C_2，C_3，C_4 将保持不变，此时 $C_{14}=C_{23}$，电容变化量 $\Delta C=0$，$V_{OUT}=0$。当有加速度作用时，可变电容器 C_1，C_2，C_3 和 C_4 的电容值将发生变化，且 C_1，C_4 和 C_2，C_3 的变化趋势相反，当其中两个电容增大时，另外两个电容会相应减小。为保证电桥的平衡，电容桥上两个电阻的阻值相等，即 $R_1=R_2=R$。图 3 中 V_1 和 V_2 的计算公式为：

$$V_1=\frac{\frac{1}{j\omega C_1+j\omega C_4}}{R_1+\frac{1}{j\omega C_1+j\omega C_4}}V_S=\frac{V_S}{j\omega R(C_1+C_4)+1} \tag{1}$$

$$V_2=\frac{\frac{1}{j\omega C_2+j\omega C_3}}{R_2+\frac{1}{j\omega C_2+j\omega C_3}}V_S=\frac{V_S}{j\omega R(C_2+C_3)+1} \tag{2}$$

式中，ω 为激励信号的角频率。

因此，本系统中电桥输出电压计算公式为：

$$V_{OUT}=V_2-V_1=\frac{V_S}{j\omega R}\left(\frac{1}{(C_2+C_3)+1}-\frac{1}{(C_1+C_4)+1}\right) \tag{3}$$

电路采用差分架构，不仅可以得到两倍的增益，使加速度计的灵敏度提高一倍，还能抵消共模噪声和干扰信号，提高电路的抗干扰能力。

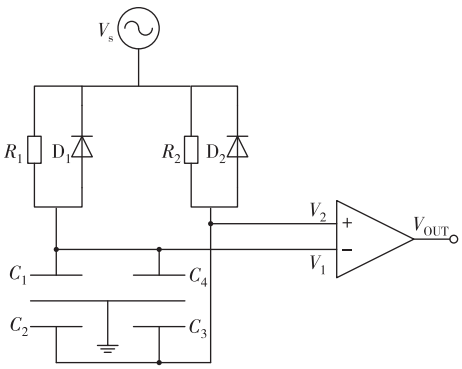


图 3 桥式电容检测接口电路

3.2 A/D 转换

STM32F303 内部的 ADC（模/数转换器）只有 12 位，如果直接使用内部的 ADC 将会严重影响测量精度，损失分辨率。为了提高数字采样精度，选用精度更高的 AD7124 作为本系统的 A/D 转换芯片。AD7124 是具有低功耗、高分辨率、低噪声及高抑制性能[12]等优势的 24 位 Σ-Δ 型 ADC，片内 8 个低噪声可编程增益阵列（PGA）可以将模拟输入信号放大，确保 ADC 中可直接输入小信号。

图 4 为设计的 AD7124 采集电路图，电容信号转换为电压信号之后，经过仪表放大器 INA819 放大输出至 AD7124 的差分输入正端 AIN0，通过 STM32F303 控制 AD7124 对输入电压的采集，其中

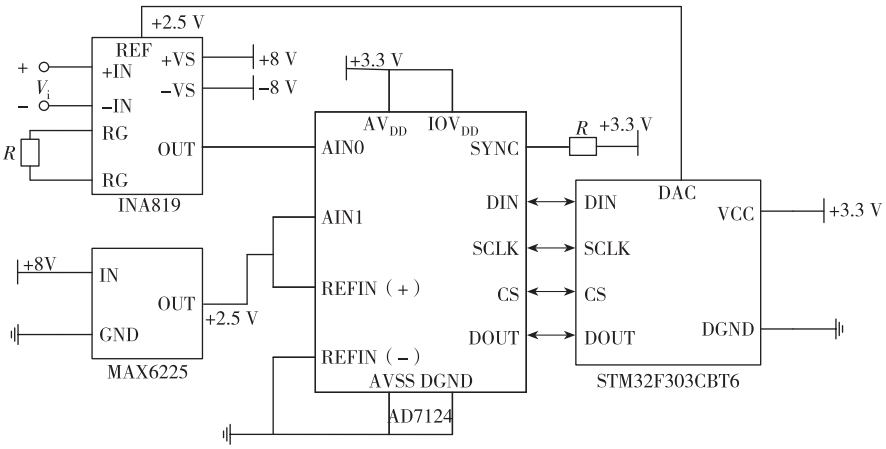


图 4 AD7124 采集电路图

REFIN(+)和 REFIN(−)引脚为 AD7124 的参考电压输入端，参考电压由外部高精度基准电压源 MAX6225 提供，参考电压 V_{REF} 为 2.5 V，同时将差分输入负端 AIN1 也固定输入 2.5 V，此时 ADC 的通道具有完全差分输入能力，AD7124 将 AIN0 与 AIN1 的差分的结果进行 A/D 转换，并通过 SPI 实现与单片机之间的通信。

加速度计输出的电压范围为 −146～+146 mV，故采用双极性模式，此时的模拟输入范围的满量程为 $\pm V_{REF}$（增益 *Gain* 默认为 1），为了充分利用输入

范围的满量程，减小分辨率的损失，需要对加速度计的输出电压进行放大，本系统采用 AD7124 片内的可编程 PGA 对模拟输入信号进行放大，增益 *Gain* 设置范围为 1～128，且不同的增益对应不同的模拟输入范围，模拟输入范围表达式为：

$$\text{模拟输入范围} = \pm V_{\text{REF}}/Gain \tag{4}$$

将信号放大至接近输入范围的满量程，不仅降低了分辨率的损失，同时可以避免加入其他干扰。*Gain* 只有为 1，2，4，8，16 的情况下才能满足本系统输入范围的要求，分辨率损失位数 N 的表达式为：

$$N = \log_2 \frac{Gain \times 146}{V_{\text{REF}}} \tag{5}$$

通过公式(4)和(5)计算得到 AD7124 的模拟输入范围、量程利用率、分辨率损失位数与 *Gain* 的关系如表 1 所示，当 PGA 的增益选择 16 时，量程利用率高达 93.44%，分辨率损失位数不到 1 位，能够精准的采集加速度计的模拟输入信号。

表 1　模拟输入范围、量程利用率、分辨率损失位数与 *Gain* 增益的关系

Gain	模拟输入范围	量程利用率/%	分辨率损失位数/Bit
1	±2.5 V	5.84	4.098
2	±1.25 V	11.68	3.098
4	±625 mV	23.36	2.098
8	±312.5 mV	46.72	1.098
16	±156.25 mV	93.44	0.098

AD7124 具有多个滤波器选项，如 sinc^3，sinc^4 等，因此在滤波器选择方面非常灵活，选择不同的滤波器就会有不同的 50 Hz/60 Hz 抑制能力、输出数据速率以及建立时间，在不同的数据输出速率下，sinc^3 和 sinc^4 的均方根噪声和频率响应不同，sinc^4 有更强的 50 Hz/60 Hz 抑制能力和在高转换速率更好的噪声表现，为兼顾输出数据速率选择 sinc^4 滤波器。

4　系统软件设计

4.1　激励信号

激励信号对电容检测系统非常重要，能够将敏感结构的电容变化量转化为电荷变化量，同时将电荷变化量调制到高频，输入至电容电压转换电路进行信号处理，避免低频噪声对系统的干扰[13]，为系统提供稳定的频率和幅度。比较常用的有正弦波和方波，但正弦波的产生比较复杂，所用元器件较方波也更多，不易集成，所以本系统选用方波作为激励信号。方波信号产生的方式有两种，一种是采用振荡电路实现的模拟式，还有一种是数字式，由于硬件电路电容、电阻、运放等元器件的参数漂移对信号频率和幅值的稳定性影响较大，为了满足加速度计对激励信号频率和精度的需求，故通过配置单片机 STM32 定时器 1 的通道 1 为 PWM 输出模式，产生幅值为 3.3 V、频率为 200 KHz、占空比为 70% 的 PWM 信号，PWM 是一种占空比可调的方波信号，该信号频率由 TIM1_ARR 寄存器值决定，其占空比由 TIM1_CCR1 寄存器值决定，TIM1_PSC 为预分频器，计算方式为：

$$\text{频率} = \text{系统时钟}/(TIM1_PSC + 1)/(TIM1_ARR + 1) \tag{6}$$

$$\text{占空比} = TIM1_CRR1/(TIM1_ARR + 1) \tag{7}$$

当定时器启动时，CNT 开始计数，只要 $TIM1_CNT \leqslant TIM1_CCR1$，电平翻转为高电平，否则为低电平，从而产生 PWM 波形。PWM 脉冲宽度调制技术可以有效地解决传统硬件电路方法中存在的参数不稳定、一致性差、容易受到外界环境的干扰等问题。

4.2　零点漂移抑制设计

MEMS 加速度计受自身制造误差和安装误差的影响，会产生较大的加速度测量误差，还有环境振动、温度变化等因素造成的漂移，严重影响加速度计的测量精度。因此，采用软件设计零点漂移抑制与跟踪算法来解决加速度计的漂移问题，通过实时跟踪记录零位偏差并进行修正，软件算法设计如图 5。

在 0 g 状态下，加速度计上电的模拟输出值要求为 2 500 mV，故直接使用 STM32F303 内部的 *DAC* 来输出电压，通过 *DAC* 对加速度计的模拟输出值进行校正，*DAC* 的上电初始值为 2 500 mV 加速度，由 AD7124 将此时的输出值读出，然后算出偏离 2 500 mV 的数值 *err*，*DAC* 减去偏差值输出新的电压值，使加速度计每次上电后的模拟输出值接近 2 500 mV。

采样加速度计前三次输出的均值作为零位初始值记作 $data0$，然后进入循环，开始采样新的加速度值记为 *data*，判断 $data0$ 与 *data* 的差值是否在零位限定范围 Δx 之内，若满足条件，且满足一定次数 n，则更新零位初始值，使 $data0 = data$，并输出 $data - data0$；如果不满足次数 n，则直接输出 $data - data0$，直到满足次数。若不满足条件在零位限定范围 Δx 之内，则输出采集到的加速度值 *data*。

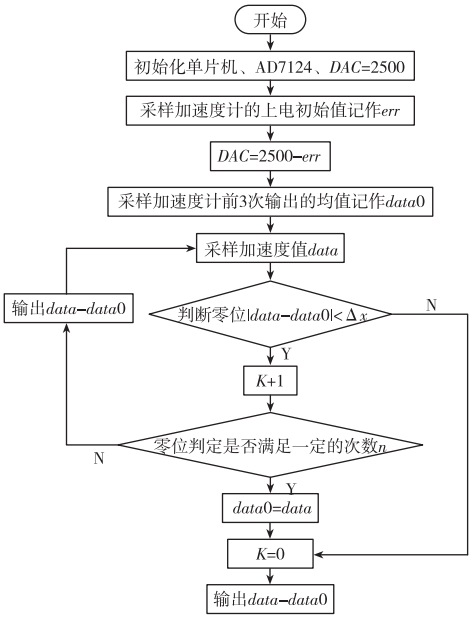


图 5 零点漂移抑制与跟踪算法

4.3 数字滤波

在实际信号处理过程中，原始信号往往存在噪声和干扰，若不进行滤波处理，会导致采样信号曲线平滑度差，且存在的脉冲干扰可能会引起逻辑判断错误，考虑到单纯的硬件滤波难以有效削弱或滤除被测信号中的噪声和干扰，因此，本设计结合了数字滤波——加权移动平均滤波来对加速度计的数据采集进行滤波处理。加权移动平均滤波本质上是一种FIR 滤波器，对周期性干扰有良好的抑制作用，平滑度高，适用于高频振荡系统。该算法的基本思路是每次采样时都丢掉最早采集的数据，从而每次取样都得到一个新的平均值，加快了数据处理的速度，降低了资源占用率，在计算均值时对滑动窗内各采样点进行了加权处理，以便更好地反应信号的变化。

给定一个长度为 N 的信号序列，移动窗口的大小为 m，给移动窗口内的数据赋予不同权重，最后计算窗口内样本平均值，得到加权移动平均模型：

$$y_n = \sum_{j=0}^{m-1} \omega_j y_{n-j} \tag{8}$$

式中，y_n 为第 n 个数据点对应的移动平均值，ω_j ($j=0,1,\cdots,m-1$)为相应数据点的权重。

在计算移动平均时，给距当前时间点更近的数据更高的权重，而给窗口内较远的数据更低的权重，能够更加强调近期的数据点，削弱远期数据的影响，以便更快捕捉近期的变化，从而实现平滑效果。

5 性能测试

在进行性能测试前，首先，需要对光学分度头的测试平台进行零刻度标定，使之与水平面平行，然后将待测加速度计产品安装在分度头的固定位置，用串口线连接好加速度计和 PC 端，检查连线无误后，接通电源，持续采集一小时。利用 Matlab 对采集到的数据进行处理分析，将原始数据和经过零点漂移抑制后的数据进行对比，绘得如图 6 所示的曲线图。

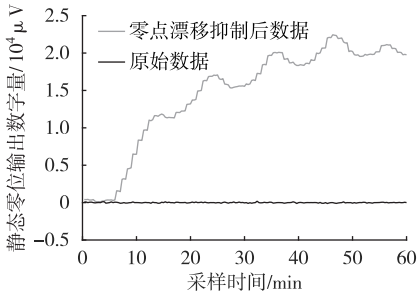


图 6 原始数据与零点漂移抑制后的数据对比结果

由图 6 可知，原始数据随着时间的推移呈现向上增长的趋势，加入零点漂移抑制与跟踪的算法后数据变化更加平稳，一直稳定在 0 值附近，改善效果明显。

为验证滤波效果，将加权移动平均滤波算法加入后，将采集到的数据与滤波前的数据进行对比分析，图 7 是加权移动平均滤波前后数据对比曲线图。

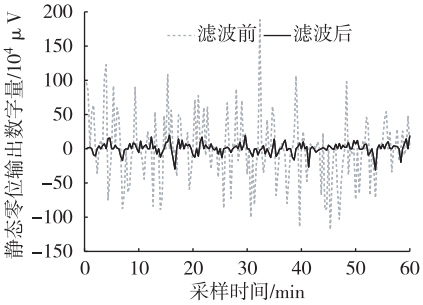


图 7 滤波前后数据对比图

由图 7 可知，在加权移动平均滤波前，静态零位输出数据波动在−0.1～0.2 mV，经过滤波后数据稳定在−0.03～0.02 mV 范围内，证明了经过处理后的数据更加稳定，系统的随机噪声明显减小，提高了曲线的平滑度。

对采集到的数据分别进行零点漂移计算，首先，求解加速度计的偏置电压，计算公式为：

$$V_0 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} V_i \tag{9}$$

式中，n 为一个小时内采样的数据个数。

然后，计算加速度计样本的均方差，公式如下：

$$\sigma=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(V_i-V_0)^2} \tag{10}$$

零点漂移的计算公式为：

$$V_s=\frac{\sigma}{K} \tag{11}$$

式中，K 为加速度计标度因数，其值为 146 mV/g。

将采集到的原始数据以及加权移动平均滤波前后的数据作为数据样本，利用公式分别求出均方差和零点漂移，结果如表 2 所示。

表 2　测试结果的均方差和零点漂移

参数	均方差/uV	零点漂移/(mg·h^{-1})
原始数据	6 694.163	45.850
零点漂移抑制后数据	47.854	0.328
滤波后数据	8.012	0.055

由表 2 的数据可知，加速度计最终的零偏稳定性由 45.850 mg/h 改善为 0.055 mg/h。经过零点漂移抑制后的数字输出相比于原始输出准确度提高了 139.89 倍，且滤波后的输出稳定度提高了 5.97 倍，此方法明显提高了输出信号的准确性和稳定性。

6　结束语

文中设计了一种基于 AD7124 的高精度 MEMS 加速度计信号处理系统，介绍了加速度计的敏感结构及工作原理，通过软硬件结合的方法，实现了加速度计在±1 g 量程下高精度的数字输出，最终测得加速度计的灵敏度为 146 mV/g，零点漂移为 0.055 mg/h，能够满足低量程加速度计的测量需求。该信号处理系统的硬件架构和软件设计为加速度计的集成、优化提供了一种设计思路。

参考文献：

[1] Wang C, Chen F, Wang Y, et al. Micromachined accelerometers with sub-$\mu g/\sqrt{}$ Hz noise floor: a review[J]. Sensors, 2020, 20(14): 4054.

[2] 宋丽君，薛连莉，董燕琴，等. 惯性技术发展历程回顾与展望[J]. 导航与控制，2021，20(1)：29-43.
Song Lijun, Xue Lianli, Dong Yanqin, et al. Review and prospect of inertial technology development[J]. Navigation and Control, 2021, 20(1): 29-43.

[3] Pike W T, Standley I M, Calcutt S B, et al. A broad-band silicon microseismometer with 0.25 NG/rtHz performance [C]// 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2018: 113-116.

[4] 范秋丽. 惯性技术在航空领域的发展与应用[J]. 飞航导弹，2017，(10)：1-6.
Fan Qiuli. Development and application of inertial technology in aviation[J]. Missiles in Flight, 2017, (10): 1-6.

[5] Ullah P, Ragot V, Zwahlen P, et al. A new high performance sigma-delta MEMS accelerometer for inertial navigation[C]// 2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS), 2015: 1-13.

[6] 朱　灿. 脉宽双加矩型加速度传感器技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2017.
Zhu Can. Research on pulse-width double-torque acceleration sensor technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[7] Bhatt G, Manoharan K, Chauhan P S, et al. MEMS Sensors for Automotive Applications: A Review [M]. In: Bhattacharya S, ed. Sensors for Automotive and Aerospace Applications. Singapore: Springer, 2019: 223-239.

[8] Zhu J, Liu X, Shi Q, et al. Development trends and perspectives of future sensors and MEMS/NEMS [J]. Micromachines, 2019, 11(1): 7.

[9] 李昕蔚，吴江波，闫　兴，等. 新型微加速度计研究进展[J]. 仪表技术与传感器，2022，(9)：1-14，35.
Li Xinwei, Wu Jiangbo, Yan Xing, et al. Research progress of novel micro-accelerometers [J]. Instrument Technology and Sensors, 2022, (9): 1-14, 35.

[10] Keshavarzi M, Yavand Hasani J. Design and optimization of fully differential capacitive MEMS accelerometer based on surface micromachining[J]. Microsyst. Technol., 2019, 25(4): 1369-1377.

[11] 陈梦佳. E 形梁结构低频 MEMS 电容式加速度计研究[D]. 杭州：浙江大学，2023.
Chen Mengjia. Research on low frequency MEMS capacitive accelerometer with E-beam structure[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.

[12] 邢震震，苏淑靖，梁文科，等. 基于 FPGA 高精度 Δ-ΣADC 温度采集存储系统设计[J]. 电子测量技术，2022，45(8)：21-26.
Xing Zhenzhen, Su Shujing, Liang Wenke, et al. Design of high precision Δ-ΣADC temperature acquisition and storage system based on FPGA [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 21-26.

[13] 唐兴刚，龙善丽，童紫平，等. 基于电容检测的高精度大量程 MEMS 加速度计设计[J]. 传感器与微系统，2023，42(3)：100-102，107.
Tang Xinggang, Long Shanli, Tong Ziping, et al. Design of high-precision large-range MEMS accelerometer based on capacitance detection[J]. Sensors and Microsystems, 2023, 42(3): 100-102, 107.

作者简介：

唐宇莎(1997－)，女，硕士研究生，主要从事惯性器件研究；

张　伟(1969－)，男，副研究员，硕士生导师，主要从事微机械惯性器件研究。