

高分辨率电容式触觉传感器微电容检测系统设计

牛正宇, 刘晓清*, 池宗桓

北京印刷学院机电工程学院, 北京

收稿日期: 2026年6月9日; 录用日期: 2026年7月1日; 发布日期: 2026年7月13日

摘要

为了解决电容式触觉传感器在检测皮法至飞法级微小动态电容时, 极易受长排线及环境寄生电容干扰而难以实现高精度信号捕获的问题, 设计了一种基于FDC2214电容数字转换芯片的高分辨率微电容检测系统。该系统采用LC谐振原理将微小电容变化直接转换为数字信号, 以抑制宽带噪声; 同时在软件层引入静态基线差分校准算法与滑动平均滤波机制, 剔除了系统固有寄生偏置与高频瞬态干扰。实验测试表明, 在0.1~7.5 pF量程内, 该系统示值波动稳定在0.004 pF以内, 实现了柔性电容阵列的高精度信号提取。

关键词

柔性电容传感器, FDC2214, LC谐振, 微弱电容检测, 差分校准算法

Design of a High-Resolution Capacitive Tactile Sensor Micro-Capacitor Detection System

Zhengyu Niu, Xiaoqing Liu*, Zonghuan Chi

School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing

Received: June 9, 2026; accepted: July 1, 2026; published: July 13, 2026

Abstract

To solve the problem that capacitive tactile sensors are susceptible to parasitic capacitance from cables and environment when detecting minute dynamic capacitance at the picofarad to femtofarad level,

*通讯作者。

文章引用: 牛正宇, 刘晓清, 池宗桓. 高分辨率电容式触觉传感器微电容检测系统设计[J]. 动力系统与控制, 2026, 15(3): 254-265. DOI: 10.12677/dsc.2026.153026

making it difficult to capture signals with high precision, a high-resolution micro-capacitance detection system based on the FDC2214 capacitance-to-digital conversion chip is designed. The system adopts the LC resonance principle to directly convert minute capacitance changes into digital signals to suppress broadband noise. Meanwhile, a static baseline difference calibration algorithm and a sliding average filtering mechanism are introduced in the software layer to eliminate the inherent parasitic bias of the system and high-frequency transient interference. Experimental tests show that within the range of 0.1 to 7.5 pF, the measurement indication fluctuation of the system is stabilized within 0.004 pF, realizing high-precision signal extraction for flexible capacitive arrays.

Keywords

Flexible Capacitive Sensor, FDC2214, LC Resonance, Weak Capacitance Detection, Differential Calibration Algorithm

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现有电容检测方案在量化微弱电容时面临诸多局限：传统模拟电路易受寄生参数与噪声淹没[1]；交流电桥法无法测量单电容且存在非线性[2]；充放电方案易受模拟开关的电荷注入与时钟馈通干扰[3]；电容-频率转换方案则对寄生电容敏感且需额外设计检测模块[4]。而在广泛应用的电容式柔性触觉传感器中[5]，其受压产生的皮法至飞法级微弱电容变化极易被上述寄生参量与环境噪声干扰[6][7]，因此亟需发展高信噪比的微电容检测技术。

为突破大规模阵列微电容检测的寄生与串扰瓶颈，本文并未局限于单一芯片的应用，而是提出了一套基于软硬件协同优化的检测机制。硬件上，利用 U29 与 U33 开关构建了行列解耦的抗干扰阵列拓扑；软件上，创新性地设计了基于定时中断的状态机异步扫描架构，并复合基线差分与滑动滤波算法。该系统有效激发了 FDC2214 芯片在复杂阵列环境下的性能潜力，为柔性触觉传感技术的高精度工程化应用提供了系统级的方法论指导。

2. 电容触觉传感器的结构原理及灵敏度计算

本文涉及的电容式柔性触觉传感器采用典型的“电极-介质-电极”三明治结构，如图 1 所示由上下两层电极和夹置于其间的柔性绝缘介质共同构成。依据平板电容理论[8]，该传感器的初始静态电容 C_0 可表示为：

$$C_0 = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot S}{d_0} \quad (1)$$

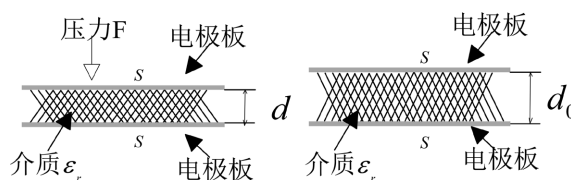


Figure 1. Structure diagram of capacitive flexible tactile sensor

图 1. 电容式柔性触觉传感器结构图

式中, ε_0 为真空介电常数, ε_r 为介质层相对介电常数, S 为极板有效面积, d_0 为极板间无压力时的初始距离。

当外界触觉压力 F 垂直作用于传感器表面时, 柔性介质层发生压缩形变, 导致电极间距减小至 d , 电容相应增加。在施加应力远小于介质杨氏模量 E 的微小触控阶段, 介质层厚度的减小量 Δd 满足胡克定律:

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta d}{d_0} \quad (2)$$

结合公式(1), 受压后的电容变化量 ΔC 为:

$$\Delta C = C - C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r S \left(\frac{1}{d_0 - \Delta d} - \frac{1}{d_0} \right) = C_0 \frac{\Delta d}{d_0 - \Delta d} \quad (3)$$

由于 $\Delta d \ll d_0$, 利用泰勒级数一阶展开近似 $\frac{1}{d_0 - \Delta d} \approx \frac{1}{d_0} \left(1 + \frac{\Delta d}{d_0} \right)$, 代入上式得:

$$\Delta C \approx C_0 \cdot \frac{\Delta d}{d_0} \quad (4)$$

最后将胡克定律导出的 $\frac{\Delta d}{d_0} = \frac{F}{ES}$ 代入, 即可得到传感器输出的电容变化量 ΔC 与触觉压力 F 的近似线性关系:

$$\Delta C \approx \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{Ed_0} F \quad (5)$$

由上式可知, 在微弱触觉按压量程内, 柔性传感元件的电容变化量 ΔC 与外部施加的微压力 F 呈高度的正比例线性关系。

3. 电容触觉传感器信号采集系统设计

微弱信号高精度提取是柔性触觉传感器感知的核心。本系统传感单元初始电容约 10 pF, 量化分辨率需优于 0.1 pF。针对长排线、交变电场工况下寄生参数、宽带噪声及多节点串扰对飞法级信号的淹没难题, 本文搭建了由 STM32、行列选通阵列、10×10 柔性传感阵列及电容转换单元组成的闭环检测硬件平台, 其整体架构与拓扑如图 2 所示。

3.1. 触觉传感单元等效阻抗模型

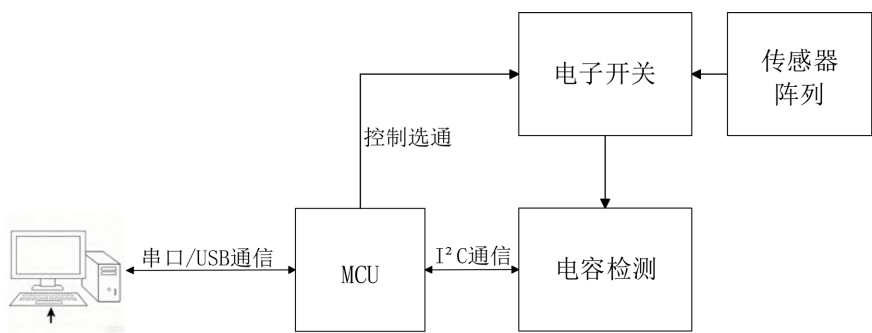
如图 3 所示, 阵列式传感器的上下电极重叠区构成了基础传感单元。在高频交变电场下, 该非理想单元可等效为待测主电容 C_x 、等效串联电阻 R_s 与分布寄生电容 C_p 组成的阻抗网络[9]。当交流激励角频率为 ω 时, 其核心容抗 Z_c 表示为:

$$Z_c = \frac{1}{j\omega C_x} \quad (6)$$

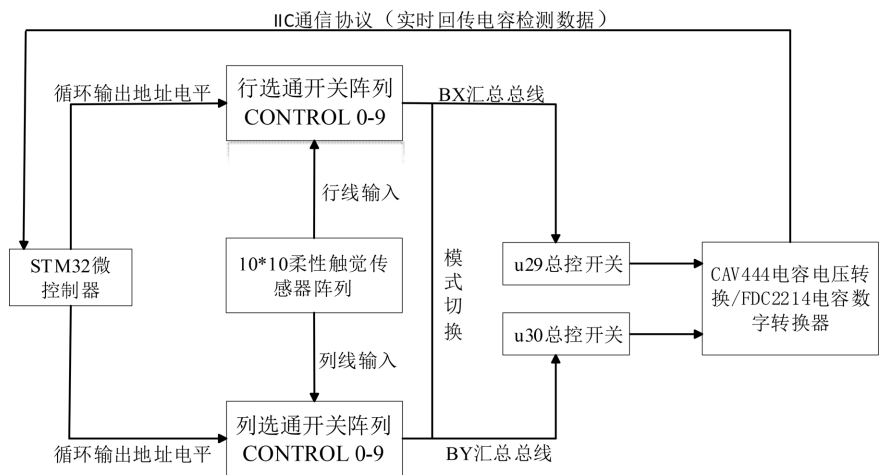
考虑到等效电阻与寄生参数, 整个传感单元对外呈现的等效复阻抗 Z 可近似表示为:

$$Z = R_s + \frac{1}{j\omega(C_x + C_p)} \quad (7)$$

式中, j 为虚数单位。外部受压引起的介质层变薄会直接改变待测电容 C_x , 进而导致传感单元整体等效



(a) 电容检测系统整体框架图



(b) 行列正交选通阵列与 FDC2214 闭环拓扑

Figure 2. Overall architecture of the capacitance detection system and array scanning circuit
图 2. 电容检测系统整体架构与阵列扫描电路

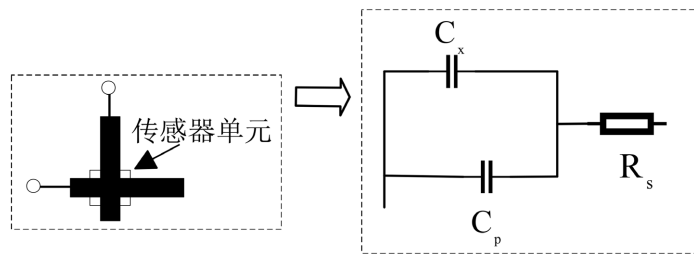


Figure 3. Sensor unit signal acquisition diagram
图 3. 传感器单元信号采集图

复阻抗 Z 发生变化。该交流阻抗响应模型构成了后续 FDC2214 与 CAV444 实现微小电容精确量化的物理基础[10]。

3.2. 传感阵列扫描电路与驱动实现

针对 10×10 柔性传感阵列，系统设计了“行 - 列”正交总线架构，利用模拟开关矩阵将 100 个传感单元的检测引线大幅缩减至 20 根。测量期间，STM32 精准驱动选通开关，将目标微电容信号汇入总线。总线后级设有双通道切换开关，以实现 FDC2214 与 CAV444 的灵活切换。

为实现高精度的时分复用扫描并抑制系统级噪声，本系统在驱动层进行了以下深度优化。

3.2.1. 物理引脚与逻辑坐标的解耦隔离

针对微控制器控制引脚离散分布的问题，底层引入了硬件抽象层映射机制。通过将物理上非连续的 IO 引脚重映射为 0~9 维逻辑连续坐标，屏蔽了底层硬件连接的差异性，显著提升了 PCB 布线与上层算法接口的灵活性。

3.2.2. 基于位移掩码解析的阵列状态映射

为提升阵列轮询响应速率，系统设计了基于位移掩码的高效解析算法。主控通过左移操作快速生成 16 位控制字，并在遍历引脚映射表时利用位与运算提取掩码状态，从而精确翻转对应物理引脚。该机制代码紧凑，保障了跨端口布线下的纳秒级状态切换。

3.2.3. 推挽强驱与有源屏蔽抗干扰策略

系统将控制 IO 配置为 50 MHz 推挽输出。在单点选通时，执行“目标引脚主动拉低，其余引脚强制拉高”的强驱策略。配合极低的推挽内阻，该机制能快速对控制线缆的杂散电容进行充放电，有效抑制了相邻线路间的电磁串扰与悬浮节点噪声。

3.2.4. 基于定时中断与状态机的阵列扫描调度

为避免阻塞式死等耗费 CPU 资源，系统采用硬件定时器与状态机接管阵列的时分复用任务。主控在定时中断内按序切换通道并植入微秒级延时，待模拟链路稳定后读取电容。这种异步调度策略实现了阵列扫描与主控通信的时序解耦，保障了高频轮询的实时性与稳定性。

3.3. CAV444 电容电压转换检测电路

图 4 虚线框内为电容电压转换电路。核心运放 U_1 、 U_2 具备低温漂与低偏置特性。检测网络由频率为 f 、幅值为 u_e 的一对反相差分脉冲，分别激励待测电容 C_x 与参考电容 C_1 。该差分架构结合运放的高共模抑制能力，有效抑制了杂散电容与共模干扰[11]。

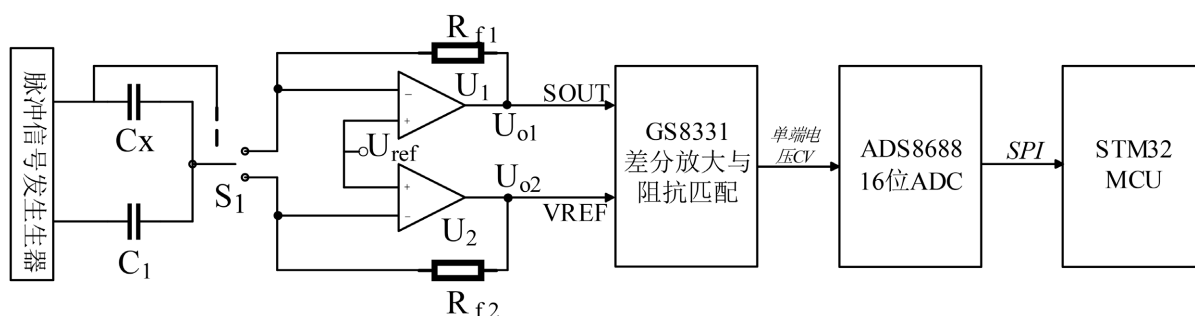


Figure 4. Architecture diagram of CAV444 capacitor voltage conversion circuit

图 4. CAV444 电容电压转换电路架构图

电路稳态下，差分脉冲交替控制内部开关，将待测与参考电容接入运放。基于电荷守恒与差分放大原理，当设定反馈电阻 $R_f = R_{f1} = R_{f2}$ 时，输出差分电压与电容差值之间满足如下严格的线性关系：

$$u_{o1} - u_{o2} = 2fV_{cc}R_f(C_x - C_{ref}) \quad (8)$$

式中， f 为脉冲频率， V_{cc} 为脉冲幅值。由式(8)可知，该转换电路的输出电压差与被测传感器的电容变化量呈正比例的线性映射。

3.4. FDC2214 电容数字检测电路设计

如图 5(a)所示, 系统的微电容提取核心由 FDC2214 芯片及外围晶振、复位与滤波电路构成。作为一款 28 位高精度电容数字转换芯片, FDC2214 具备 0.93 fF 的理论分辨率与 10 kHz~10 MHz 的宽工作频带, 结合高兼容性的 I²C 接口, 高度契合低功耗微弱电容的检测需求。

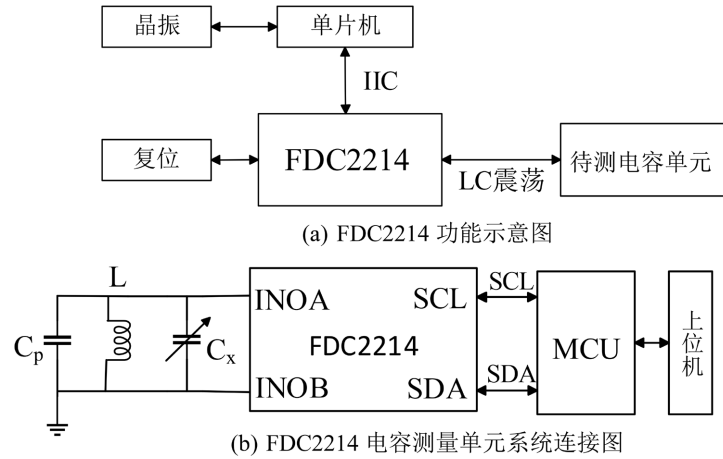


Figure 5. Functional diagram and measurement unit connection of FDC2214

图 5. FDC2214 功能示意及测量单元连接图

如图 5(b)所示, 触控受压引起的微电容变化会导致 FDC2214 外部 LC 谐振频率发生偏移[12]。芯片精确捕获该频偏并直接量化为数字信号回传[13]。该 LC 数字化架构彻底规避了传统模拟电路易受干扰的弊端, 显著提升了系统信噪比。

3.5. 基于基线差分与滑动滤波的复合降噪算法

尽管硬件驱动已极大地抑制了动态切换噪声, 但在实际物理链路中, 测得的总电容 C_{Total} 仍不可避免地叠加了系统恒定寄生电容 $C_{parasitic}$ 与随机环境热噪声 C_{noise} [14]。其等效测量模型为:

$$C_{Total} = C_{tactile} + C_{parasitic} + C_{noise} \quad (9)$$

为了提取纯净的触觉受力电容增量 $C_{tactile}$, 系统设计了基线差分校准与滑动滤波算法, 该算法分为以下三个阶段:

(1) 空载静态基线标定

开机无负荷状态下, 系统对阵列各交叉节点连续采集 N 次数据并求均值, 以此滤除零均值随机噪声, 生成并存储系统的静态基底偏置矩阵:

$$C_{base}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C_{Total_k}(i, j) \quad (10)$$

其中, N 为初始化采样总次数, $C_{Total_k}(i, j)$ 为第 k 次采样时节点 (i, j) 的总电容测量值, $C_{base}(i, j)$ 为该节点的静态基底偏置。

(2) 实时基线差分校准

当传感器正式进入工作扫描模式时, 系统实时调用基线差分算法。通过将当前采样值减去初始化阶段标定的基底偏置, 有效抹除了环境及硬件链路引入的寄生漂移电容。其差分计算公式为:

$$C_{diff}(k) = C_{Total}(k) - C_{base} \quad (11)$$

其中 k 为系统在工作扫描模式下的当前离散采样时刻。 $C_{Total}(k)$ 为在第 k 时刻，微控制器从 FDC2214 读取到的原始含偏置总电容值， $C_{diff}(k)$ 为在第 k 时刻，扣除静态偏置后得到的有效电容增量。

(3) 引入滑动平均滤波

在通过式(11)剔除系统固有静态寄生电容后，为进一步抑制高频瞬态干扰及环境随机噪声，本文引入滑动平均滤波机制。其离散化表达式为：

$$C_{out}(k) = \frac{1}{W} \sum_{j=0}^{W-1} C_{diff}(k-j) \tag{12}$$

其中 k 为当前采样时刻， $C_{out}(k)$ 为滤波后输出值， $C_{diff}(k-j)$ 为差分校准后的电容序列值， W 为滑动窗口长度。

4. 实验测试与性能分析

选取标称值在 0.1~7.5 pF 范围内的电容作为测试样本，以 TH2822E 高精度手持电容测试仪的实测读数作为参照基准，验证本系统对微小电容信号提取的准确性与线性度。

4.1. 微电容检测系统精度验证与量程分析

在本次实验中，以手持测试仪为参照基准，对比研究两种微电容检测电路。通过表 1 可对比观察标准仪器与两种被测电路在关键性能指标上的实测数据。

Table 1. Measured data of key parameters of the micro-capacitance sensor unit circuit module
表 1. 微电容传感单元电路模块关键参数实测数据

电容标称值 /pF	手持测试仪 /pF	FDC2214 电容转换芯/pF	CAV444 电容电压转器/pF	FDC2214 相对误差/%	CAV444 相对误差/%
0.1	0.115	0.114	0.079	0.87	31.30
0.5	0.490	0.492	0.379	0.40	22.65
1.0	1.178	1.168	0.899	0.85	23.68
2.0	2.062	2.060	2.012	0.10	2.42
3.0	2.869	2.873	3.086	0.14	7.56
4.0	4.085	4.068	4.111	0.42	0.64
5.0	5.050	5.039	5.087	0.22	0.73
6.0	6.028	6.023	6.151	0.08	2.04
7.0	7.072	7.046	7.199	0.37	1.80
7.5	7.480	7.491	7.620	0.15	1.87

在 0.1 pF 极小电容下，CAV444 因运放输入偏置电流与固有电容的主导作用致使信噪比骤降，误差高达 31.30%并呈现严重非线性。相比之下，FDC2214 的 LC 谐振架构展现出极佳的线性度，各项误差指标均远低前者，证实了其在微弱信号高精度捕获上的显著优势。

4.2. 系统抗干扰与稳定性分析

4.2.1. 温度漂移测试

采用差分测量法在 25℃至 55℃范围内对系统进行温漂实测。如图 6 所示，升温过程中的系统输出漂

移量仅约 0.04 pF，验证了基线差分校准算法对缓变温漂具有良好的抑制能力。值得注意的是，当温度高于 40℃ 时，系统漂移呈现出微弱的非线性增长趋势。这主要是由于柔性介质材料在高温下热膨胀系数的非线性变化，以及 PCB 走线寄生电容的高温温漂累积所致，但整体漂移量仍处于可控范围内。

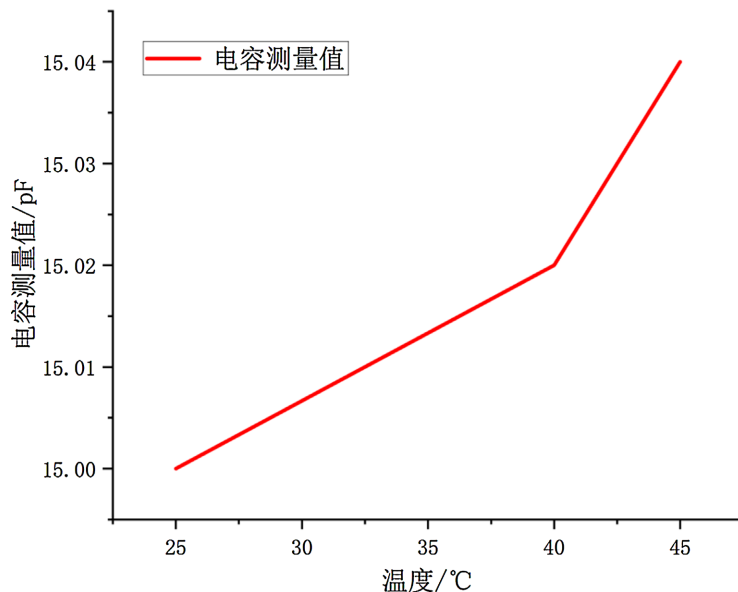


Figure 6. Temperature drift test results

图 6. 温度漂移测试结果

4.2.2. 长期稳定性测试

如图 7，预热后在 25℃ ± 2℃ 环境下连续运行 24 小时的测试表明，系统空载零点漂移小于 0.01 pF (漂移率约 0.0004 pF/h)。该极低的漂移率验证了系统具备出色的长期稳定性，完全满足柔性触觉传感的连续工作需求。

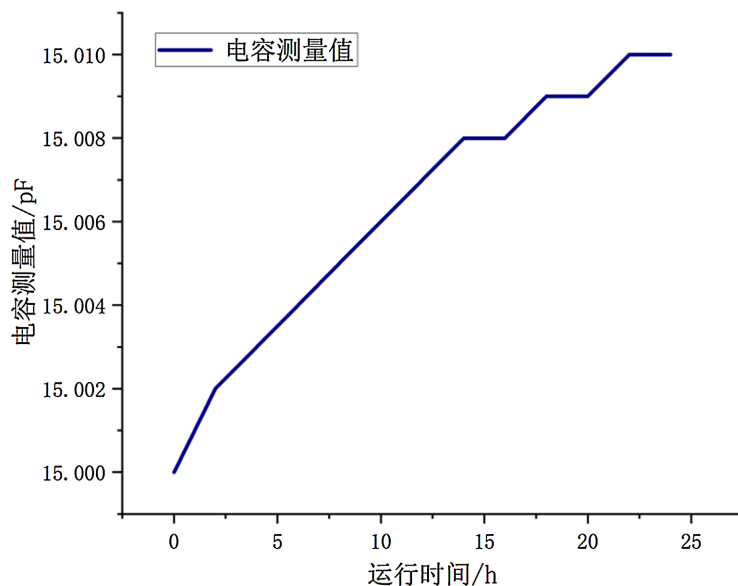


Figure 7. Long-term stability test results

图 7. 长期稳定性测试结果

4.3. 模拟与数字检测方案的稳态传递特性对比分析

为对比两种转换单元的稳态传递特性，本文开展了宽量程阶跃电容标定实验。对于 CAV444 模拟电路，馈入 50 kHz、5 V 的反相差分脉冲并采集其输出差分电压 ($u_{o1} - u_{o2}$)；对于 FDC2214 数字电路，则经 I²C 总线直接读取 LC 谐振输出的高分辨率数字码。两者的双轴标定特性实测结果如图 8 所示。

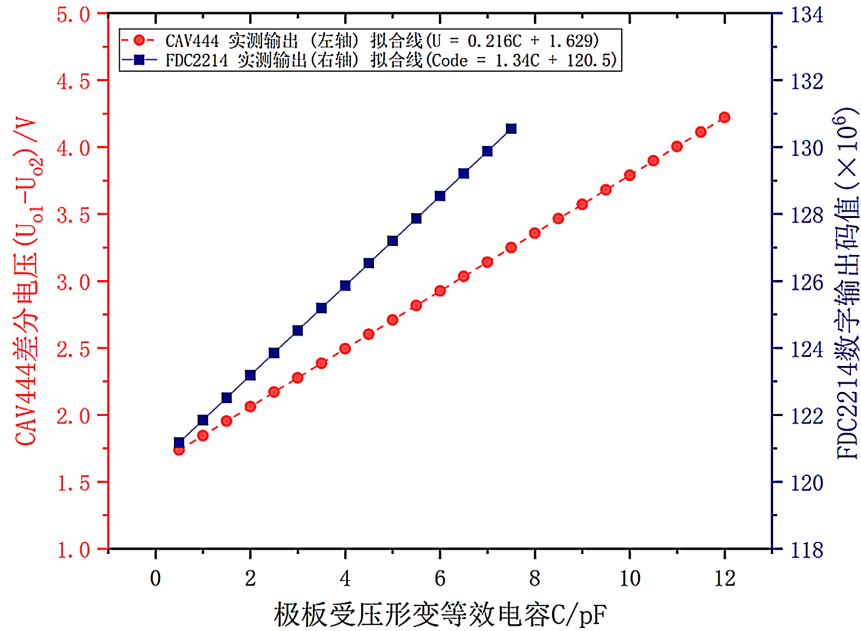


Figure 8. Calibration characteristics comparison of the two conversion schemes
图 8. 两种转换方案的标定特性对比

如图 8 所示，两套方案在量程内均呈良好线性。CAV444 受寄生参数与运放偏置影响，存在明显的纵向基线平移，暴露出模拟电路易受静态干扰的局限。相比之下，FDC2214 在 0.5~7.5 pF 核心区间内线性度极佳，其 LC 谐振数字化架构直接将电容增量转为数字码，从底层规避了基线漂移与二次转换损耗，为微弱信号提取提供了更高保真的硬件基底。

4.4. 柔性电容触觉传感器功能测试

10 × 10 阵列集成测试表明(图 9)，空载基线高度收敛于 15.0 pF，证实硬件解耦有效。消融实验中，相比于控制 U29 与 U33 进行 100 μs 阻塞延时读数的“标准循环扫描”基准，优化后的状态机调度机制通过 500 μs 精确非阻塞稳态延时，使受压中心节点平滑响应至 16.2 pF，规避了标准扫描因谐振未稳导致的响应跌落(仅 15.9 pF)与毛刺干扰。该机制成功捕获了更完整的电荷转移过程，使有效动态响应量提升约 66.7%，在有效抑制电荷耦合偏移的同时，确保了系统在高频轮询下的空间分辨力与信号高保真度。

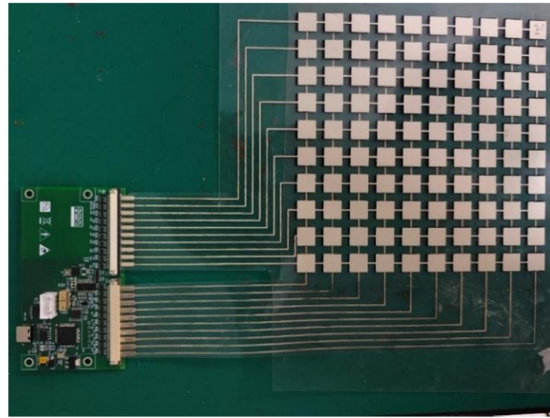
4.5. 基线差分校准与数字滤波抗干扰验证

针对硬件链路引入的静态寄生与环境动态高频噪声，本文开展了复合算法降噪验证实验。如图 10(a)所示，系统原始输出存在约 4.85 pF 的静态偏置，启动基线差分校准后信号迅速归零，有效剥离了静态杂散电容。

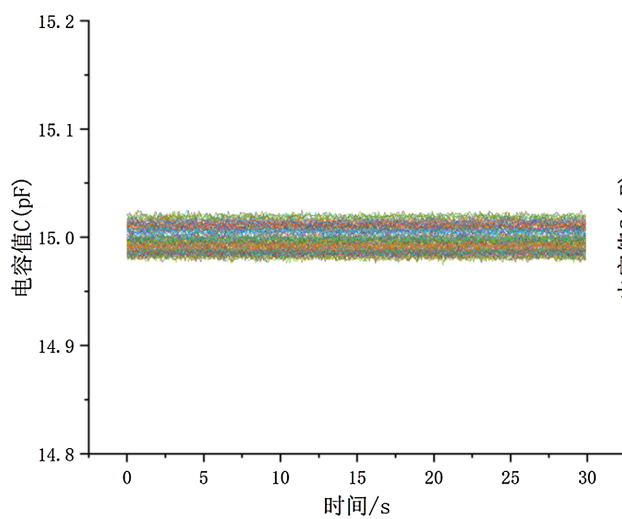
针对差分归零后仍残留的约 0.012 pF 瞬态毛刺，如图 10(b)系统引入滑动平均滤波。对比实验，如表 2 表明，窗口 W 过小或过大会导致残余噪声显著或响应严重滞后；如图 10(c)当选择 $W = 8$ 时取得了最佳

平衡, 将高频波动压制在 0.004 pF 以内, 同时保持了 20 ms 的快速阶跃响应。

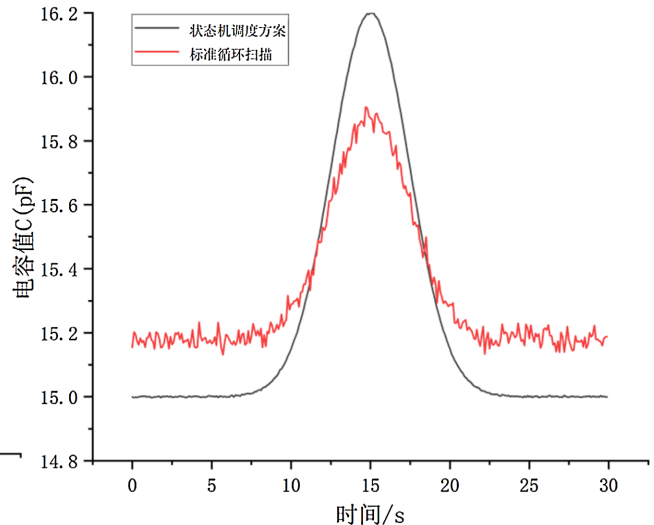
实验证实, 该静态去偏置与动态降噪的解耦算法将系统信噪比提升了约 3 倍, 不仅保障了空载零点稳定性, 更为微小触觉压力的精确提取奠定了坚实基础。



(a) 微电容传感系统



(b) 10×10 传感阵列全局空载基线分布



(c) 不同扫描机制下的动态响应特性对比

Figure 9. Performance testing and ablation experiment results of the flexible capacitive array acquisition system, with an array scan period of 100 ms , a total of 300 frames collected, and an overall observation duration of 30 s

图 9. 柔性电容阵列采集系统性能测试与消融实验结果, 阵列扫描周期为 100 ms , 共采集 300 帧, 总观测时长 30 s

Table 2. Comparison of filtering performance under different sliding window lengths

表 2. 不同滑动窗口长度下的滤波效果对比

窗口长度/ W	输出波动峰值/ pF	阶跃响应上升时间/ ms	综合评述
2	0.011	8	噪声抑制不足
4	0.008	12	噪声部分抑制
8	0.004	20	噪声与响应均衡
16	0.003	35	响应延迟明显
32	0.002	60	响应严重滞后

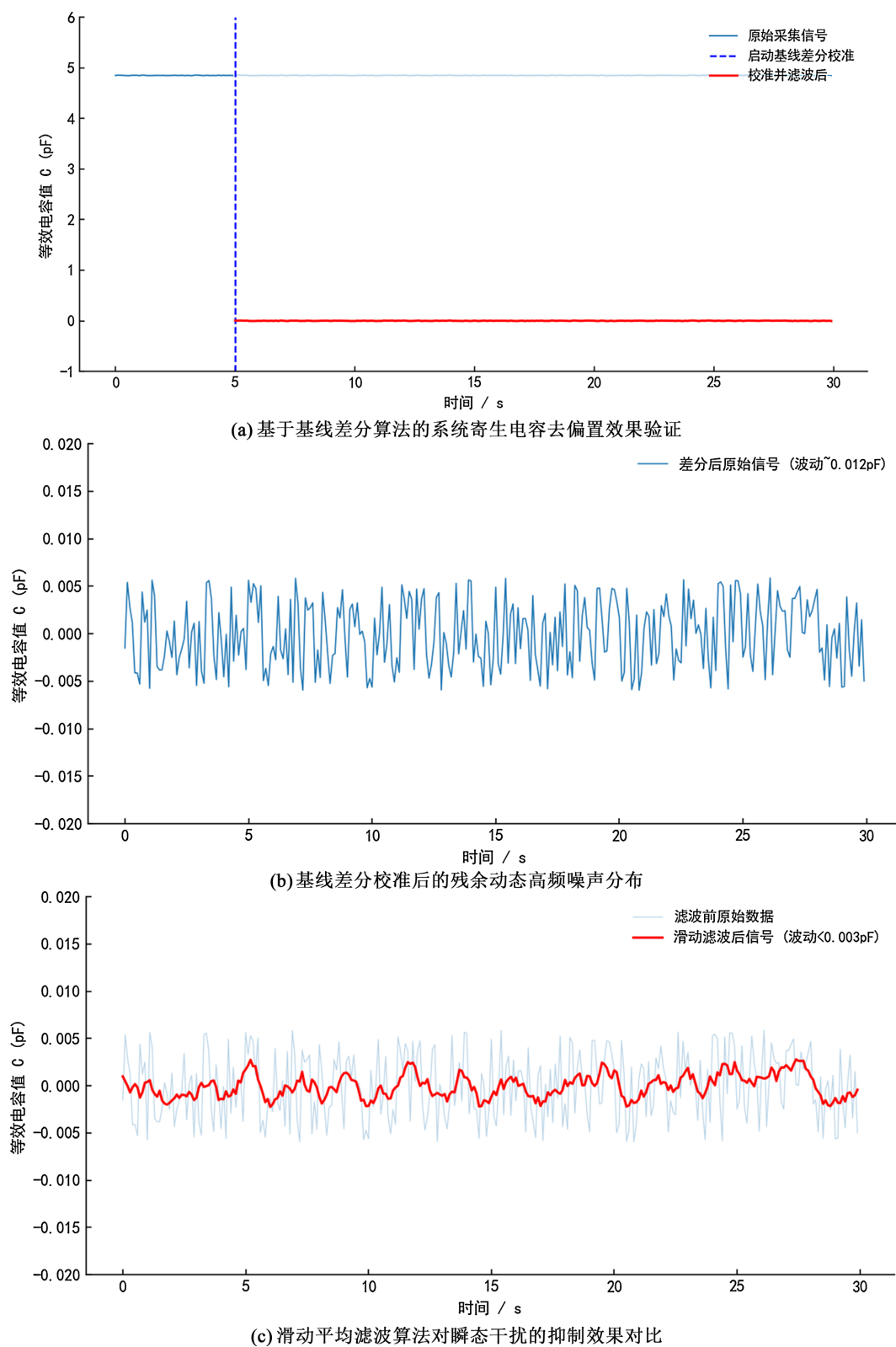


Figure 10. Comparison of capacitance signals before and after digital filtering under no-load condition, with an array scan period of 100 ms, a total of 300 frames collected, and an overall observation duration of 30 s

图 10. 空载状态下数字滤波前后电容信号对比, 阵列扫描周期为 100 ms, 共采集 300 帧, 总观测时长 30 s

5. 结语

为解决大规模柔性触觉阵列的寄生干扰问题, 本文设计了一种高分辨率微电容检测系统。系统采用状态机异步调度与硬件解耦的扫描架构, 消除节点电荷耦合, 使动态响应提升约 66.7%; 同时引入静态去偏置与动态降噪复合算法, 在 0.1~7.5 pF 量程内将波动控制在 0.004 pF 以内。该软硬件协同方案突破了传统检测极限, 为高密度触觉感知的工程化落地奠定了坚实基础。

参考文献

- [1] Chen, J., Huang, R., Zhao, K., Wang, W., Liu, L. and Li, W. (2021) Multiscale Convolutional Neural Network with Feature Alignment for Bearing Fault Diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **70**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/tim.2021.3077673>
- [2] Jeong, J., Jo, H., Laflamme, S., Li, J., Downey, A., Bennett, C., et al. (2022) Automatic Control of AC Bridge-Based Capacitive Strain Sensor Interface for Wireless Structural Health Monitoring. *Measurement*, **202**, Article 111789. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111789>
- [3] Wu, D., Qian, C., Zhang, X., Wang, Z. and Liu, X. (2020) Design of a Capacitance Measurement Circuit with Input Parasitic Capacitance Elimination. 2020 *IEEE 5th International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM)*, Nanjing, 23-25 October 2020, 53-57. <https://doi.org/10.1109/icim50929.2020.9292245>
- [4] Tushar, T. and Sumathi, P. (2020) Frequency Estimation Techniques in Capacitance-to-Frequency Conversion Measurement. *The Review of Scientific Instruments*, **91**, Article 015005.
- [5] 蒋春辉, 周子超, 许新宇, 等. 一种基于 Sigma-Delta 调制器的高精度电容检测芯片的设计与实现[J]. 微电子学, 2025, 55(4): 570-578.
- [6] Zhong, L., Yang, J., Xu, D. and Lai, X. (2020) Bandwidth-Enhanced Oversampling Successive Approximation Readout Technique for Low-Noise Power-Efficient MEMS Capacitive Accelerometer. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, **55**, 2529-2538. <https://doi.org/10.1109/jssc.2020.3005811>
- [7] Luo, Z.B., Chen, J., Zhu, Z.F., et al. (2021) High-Resolution and High-Sensitivity Flexible Capacitive Pressure Sensors Enhanced by a Transferable Electrode Array and a Micropillar-PVDF Film. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **13**, 7635-7649.
- [8] 朱盛鼎, 陈冬冬, 雷静桃. 触觉传感器与电子皮肤研究进展[J]. 电子机械工程, 2022, 38(4): 4-9.
- [9] Meng, H., Shi, Y., Bao, G., et al. (2024) Flexible Tactile Sensor Arrays with Capacitive and Resistive Dual-Mode Transduction. *IEEE Sensors Journal*, **24**, 18635-18644.
- [10] 宋泽乾, 罗轩梓, 刘爱萍. 基于电容式传感阵列的空间三维力解耦系统开发[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(11): 35-42.
- [11] 方硕, 侯长波, 王立晶, 等. 基于时分复用全差分技术的电容检测模拟接口 ASIC [J]. 实验技术与管理, 2025, 42(8): 133-140.
- [12] 刘皓. 锂电池间表面电容检测及预警技术研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.
- [13] 沈磊超. 基于并行驱动的自互电容一体式触控系统设计[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2025.
- [14] 赵毅强, 寇诗逸, 叶茂. MEMS 陀螺仪高精度低噪声检测电路设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(12): 96-104.