



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

基于接触起电效应的柔性薄膜传感阵列系统

作者姓名: 朱晓泉

指导教师: 朱光 研究员

国家纳米科学中心

学位类别: 理学博士

学科专业: 凝聚态物理

培养单位: 国家纳米科学中心

2018 年 5 月

Contact Electrification Effect Based
Flexible Thin Film Sensor Array System

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Philosophy
in Condensed Matter Physics

By

Xiaoxiao Zhu

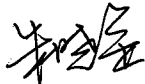
Supervisor: Professor Guang Zhu

National Center for Nanoscience and Technology

May 2018

中国科学院大学
研究生学位论文原创性声明

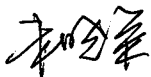
本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。

作者签名： 
日 期： 2018.5.30

中国科学院大学
学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院有关保存和使用学位论文的规定，即中国科学院有权保留送交学位论文的副本，允许该论文被查阅，可以按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名： 
日 期： 2018.5.30

导师签名： 
日 期： 2018.5.31

摘 要

能够对物体进行定位示踪的传感技术在电子商务、工业自动化、智能家居,可穿戴式电子设备,安全防盗、人流监控、医疗健康、交通监管和灾害预警等日常生活和社会生产领域中有着极为重要的应用价值和广阔的应用前景。

基于接触起电效应的柔性传感阵列不仅可以定位接触物体的接触位置,同时还能够感知接触物体移动的轨迹,以及接触物体的表面形貌。

为了解决基于接触起电效应的柔性传感阵列中面临的严重信号干扰,获得单元结构合理,输出信号干扰低的柔性传感阵列,本文经过系统的模拟仿真和实验测试,研究了抑制阵列信号干扰的方法,比较了不同传感单元的结构设计。本论文的研究工作主要包括以下几个方面:

1. 设计并制作了一种相互嵌套式结构的基于接触起电效应的柔性传感单元和阵列。该结构对传感单元电极进行了图案化设计,将行传感单元电极和列传感单元电极集成到一个传感单元内,实现了物体接触单个传感单元即可定位接触物体的在传感阵列中的位置,有效的利用了传感器件中有限的平面空间。同时利用有限元分析软件考察了集成到单个传感单元内行列电极相对大小对阵列输出信号幅值的影响,当行电极面积与列电极面积之比为 1 时,模拟仿真得到的行电极信号输出幅值与列电极信号输出幅值相差最小,并以此为相互嵌套式传感单元内行列电极相对大小的最佳比例。

2. 首次在基于接触起电效应的柔性传感单元和阵列中引入屏蔽电极及屏蔽层的设计。利用相互嵌套式结构设计,将引入的屏蔽电极和屏蔽层集成到基于接触起电效应的柔性传感单元和阵列中,有效的抑制了传感单元内部电极之间的信号干扰。此外,还利用有限元分析软件考察了屏蔽电极对干扰信号抑制的效果,结果显示,没有带孔屏蔽电极层的传感阵列模拟仿真得到的近端串扰(NEXT)为 0.82,在引入带孔屏蔽电极层情况下,传感阵列模拟仿真得到的信号输出 NEXT 达到了 0.01,引入的屏蔽电极层对干扰信号的抑制效果显著。

3. 利用激光雕刻工艺制作了 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列,采用特氟龙布作为摩擦层材料,用导电布作为电极层材料,获得了柔性超薄的传感阵列。同时测量了大面积自驱动柔性触觉传感阵列在单点触碰、多

点触碰情况下的信号输出幅值,结果显示在测量时,传感阵列信号输出幅值达到了 25 V,而干扰信号输出幅值约为 0.25 V, NEXT 值低至 0.01,表明传感阵列干扰信号被有效抑制。此外还考察了制作的传感阵列信号输出的一致性以及在 100K 次测试条件下传感阵列信号输出的稳定性,制作的传感阵列各单元信号输出幅值相差在 0.05 以内,具有非常好的一致性。经过 100K 次测试后,传感阵列的信号输出幅值几乎没有衰减。

4. 利用微纳加工工艺制作了一种高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列,获得了单元尺寸为 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 的阵列为 60×60 的高分辨率自驱动触碰传感阵列,制作的传感阵列分辨率达到了 50 dpi,是目前报道的基于接触起电和静电耦合效应的传感阵列最高分辨率的 25 倍。制作的传感阵列 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 有效传感区域中包含了 3600 个传感单元,传感单元密度达到了 400 个/ cm^2 。制作完成的传感阵列厚度仅有 $20 \mu\text{m}$,具有非常好的柔性。经过小信号处理电路处理后,传感阵列输出信号幅值达到了约 0.4 V, NEXT 值低至 0.05。

5. 结合信号处理电路展示了传感阵列在室内定位,电子签名,轨迹追踪以及图案采集等方面的应用。

本论文致力于解决基于接触起电效应的柔性传感阵列面临的严重信号干扰问题,引入屏蔽电极有效的抑制了传感阵列内单元之间信号干扰以及来自于环境中的工频干扰和电磁信号干扰。同时设计了一种相互嵌套式的传感单元和阵列结构,并利用有限元分析软件模拟计算得到最佳的结构参数。此外,结合信号处理电路,展示了设计制作的柔性传感阵列在室内定位,电子签名,轨迹追踪以及图案采集等场景下的应用,展现了基于接触起电效应的柔性传感阵列在人机交互,智能家居,安防及健康监护等领域的应用前景。

关键词: 接触起电, 触觉传感, 摩擦纳米发电机, 柔性传感阵列

Abstract

Sensing technology that can locate and track objects has very important value and broad prospect of application in fields of e-commerce, industrial automation, smart home, wearable electronic devices, security, crowd control, health care and disaster warning.

Triboelectrification and electrostatic induction based flexible sensing array can acquire the position and the trajectory as well as the shape profile of the contact object.

For the purpose of solving the serious signal interferences among the electrodes and getting a flexible sensing array with reasonable unit structure and low output signal interference, we studied the methods for suppressing signal interference, designed and compared a number of sensing unit structure by systematic simulation calculation and experimental test. The research work of this paper mainly includes the following aspects:

Firstly, a triboelectrification enabled flexible sensing array was developed. The row electrode and the column electrode of the flexible sensing array were patterned and integrated into a sensing unit with one-to-one correspondence, which can locate the position of the contact object by only one sensing node, and effectively improve the utilization rate of the limited planer space in the sensing array. With the assistance of the finite element analysis software, the area ratio of the row electrode area to the column electrode area was studied, and the results showed that when the value of the area ratio was 1, there was the minimum difference of the signal output between the row electrode and column electrode, and this area ratio was set as the optimal structural parameters for the sensing unit and array.

Secondly, a shielding layer was proposed and introduced into the triboelectrification enabled sensing array. The shielding layer was integrated into the sensing node and sensing array laying between the row electrode layer and column electrode layer. This layer can effectively eliminate the electrostatic induction among the row electrode lines and the column electrode lines in vertical direction as well as adjacent sensing units of the same electrode layer in lateral direction. Therefore, crosstalk will be largely reduced. The effect of suppressing interference signals was calculated by infinite element analysis and evaluated

by near end crosstalk (NEXT), and the results showed that the calculated NEXT is 0.82 without the shielding layer, while the NEXT reaches 0.01 when the shielding layer is introduced into the sensing array, which proves the effectiveness of the shielding layer.

Thirdly, an 8×8 triboelectrification enabled flexible and area-scalable sensing array was fabricated by laser-cutting process. The triboelectrification layer was made of polytetrafluoroethylene (PTFE) fabric and the electrode layer was made of the conductive fabric, which gave the sensing array good flexibility. The signal output voltage of the sensing array was generated under the single point and multi-points test condition. The results shows that the signal output voltage of the electrodes under the contacted position reaches 25 V while the signal output voltage of the others are only 0.25 V, the calculated NEXT is only 0.01, which reflects the low crosstalk in the sensing array. The consistency and the stability of the sensing array were all tested. There is a small difference between the maximum and the minimum signal output voltage of the sensing array, the maximum difference of the normalized signal output voltage is only 0.05, which demonstrates the good consistency of the sensing array. The signal output voltage from a row electrode line and a column electrode line keeps unchanged after 100k repeated contacts at a frequency of 10 Hz, which shows exceptional stability of the sensing array.

Fourthly, a 60×60 high-resolution, triboelectrification-enabled flexible sensing array was fabricated by microelectro mechanical systems (MEMS) process. It has a total of 3,600 sensing units and a resolution of 50 dots per inch (dpi), which are 14 times and 25 times of the state-of-the-art works on the triboelectric sensor array, respectively. When touched by an external object, the ITESM generates a voltage signal in its bit electrode lines and word electrode lines due to the combination of triboelectrification and electrostatic induction. With the assistance of a signal processing circuit that filters and amplifies the electric signal, an average voltage signal of 0.4 V can be acquired. Due to the design of a shielding layer, the electrostatic induction among adjacent electrode lines are effectively eliminated, resulting in a NEXT of merely 0.05.

Fifthly, applications of the sensing array were demonstrated in indoor-positioning, electronic signature, trajectory-tracking and shape-profile-acquiring combined with signal

processing circuits.

This work was attributed to solve the serious interferences among the electrode lines of the triboelectrification-based flexible sensing array. The row electrode, the column electrode and the shielding layer were integrated into a sensing node by patterned design, which effectively suppress the crosstalk and signal interferences and improve the utilization rate of the limited planer space in the sensing array. The finite element analysis was used to simulate and calculate the structural parameters, which shows 1 is the optimal area ratio. Finally, applications of the designed sensing array were demonstrated in indoor-positioning, electronic signature, trajectory-tracking and shape-profile-acquiring combined with signal processing circuits, which shows broad prospects of the triboelectrification-enabled flexible sensing array in human-machine interfaces, smart home, security, health monitoring, etc.

Key Words: triboelectrification, touch sensor, triboelectric nanogenerator, sensor array

目 录

第一章 引言	1
1.1 研究工作的背景	1
1.2 柔性传感器件的研究进展	1
1.2.1 基于电容原理的柔性传感器件	2
1.2.2 基于压阻原理的柔性传感器件	4
1.2.3 基于压电原理的柔性传感器件	6
1.3 接触起电效应的研究进展	8
1.3.1 接触起电效应在摩擦纳米发电机中的应用	10
1.3.2 摩擦纳米发电机的四种结构	10
1.4 摩擦纳米发电机在柔性传感方面应用的研究现状	13
1.4.1 基于摩擦纳米发电机的单个传感单元	13
1.4.2 基于摩擦纳米发电机的传感阵列	15
1.5 本文的选题思想和主要内容	17
第二章 基于接触起电效应的柔性传感器件的工作原理	21
2.1 前言	21
2.2 基于接触起电效应的柔性传感器件的工作原理	21
2.2.1 接触分离式柔性传感器件	21
2.2.1.1 接触分离式柔性传感器件的结构	21
2.2.1.2 接触分离式柔性传感器件的信号产生原理	22
2.2.2 单电极式柔性传感器件	23
2.2.2.1 单电极式柔性传感器件的结构	23
2.2.2.2 单电极式柔性传感器件的信号产生原理	23
2.3 两种结构的柔性传感器件比较	24
2.4 本章小结	24
第三章 基于接触起电效应的柔性传感器件单元和阵列的结构研究	27
3.1 前言	27

3.2	传感器件单元和阵列的工作原理.....	28
3.3	传感器件单元和阵列的结构研究.....	28
3.3.1	方块形单元结构和阵列研究	28
3.3.1.1	方块形单元结构设计.....	28
3.3.1.2	方块形单元传感阵列.....	29
3.3.1.3	带屏蔽设计的方块形单元传感阵列.....	32
3.3.2	工字形单元结构这阵列研究	34
3.3.2.1	工字形单元结构设计.....	34
3.3.2.2	工字形单元传感阵列.....	35
3.3.3	相互嵌套式单元结构和阵列研究	38
3.3.3.1	相互嵌套式单元结构设计	39
3.3.3.2	相互嵌套式传感单元阵列.....	40
3.4	本章小结.....	43
第四章	柔性传感阵列的仿真模拟研究.....	45
4.1	前言.....	45
4.2	柔性传感阵列的器件结构.....	46
4.3	影响信号输出的关键阵列结构因素.....	47
4.3.1	传感阵列具体模拟仿真方法	47
4.3.2	屏蔽层设计对传感阵列信号输出的影响	54
4.3.3	行列电极相对大小对传感阵列信号输出的影响	56
4.4	本章小结.....	59
第五章	大面积自驱动柔性触觉传感阵列.....	61
5.1	前言.....	61
5.2	大面积柔性传感阵列结构.....	62
5.2.1	柔性传感阵列结构及组成	62
5.2.2	柔性传感阵列的制作方法	66
5.3	大面积柔性传感阵列的性能研究.....	66
5.3.1	柔性传感阵列摩擦层材料表征	67
5.3.2	柔性传感阵列导电层材料表征	68
5.3.3	柔性传感阵列单点测试结果	71

5.3.4 柔性传感阵列多点测试结果	73
5.3.5 柔性传感阵列稳定性和一致性测试结果	74
5.4 本章小结	78
第六章 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列	81
6.1 前言	81
6.2 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列	82
6.2.1 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列结构及组成	82
6.2.2 高分辨率自驱动触碰传感阵列的工作原理	83
6.2.3 高分辨率自驱动触碰传感阵列位置定位原理	84
6.2.4 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列完整制备工艺	85
6.3 高分辨率自驱动触碰传感阵列测试结果	89
6.3.1 高分辨率自驱动触碰传感阵列起电层材料性能表征	89
6.3.2 高分辨率自驱动触碰传感阵列一致性研究	91
6.3.3 高分辨率自驱动触碰传感阵列的小信号处理电路	93
6.3.4 高分辨率自驱动触碰传感阵列的输出测试	94
6.3.5 高分辨率自驱动触碰传感阵列的稳定性研究	96
6.4 本章小结	98
第七章 基于接触起电效应的柔性传感阵列应用研究	101
7.1 前言	101
7.2 自驱动柔性触觉传感阵列应用于室内定位	102
7.2.1 自驱动柔性触觉传感阵列信号处理电路	102
7.2.2 自驱动柔性触觉传感阵列应用展示	102
7.3 自驱动柔性触觉传感阵列应用于电子签名和轨迹追踪	105
7.3.1 自驱动柔性触觉传感阵列信号处理电路	105
7.3.2 自驱动柔性触觉传感阵列应用展示	106
7.4 自驱动触碰传感阵列应用于高分辨率图像采集	107
7.5 本章小结	111
第八章 全文总结与展望	113
8.1 工作总结	113
8.2 后续工作与展望	115

参考文献	117
作者简介及在学期间发表的学术论文与研究成果	127
致 谢	133

第一章 引言

1.1 研究工作的背景

能够对物体进行定位示踪的传感技术在日常生活和社会生产中有着极为重要的应用价值和广阔的应用前景。一方面,在小面积范围内,以高分辨率触控屏幕为代表的人机交互界面已经越来越普遍地应用于电子商务、工业自动化、智能家居和可穿戴式电子设备等;^[1-5]另一方面,在大面积范围内,覆盖广泛的定位示踪传感阵列将能够感知包括人体、动物甚至车辆等在内的大型物体,有望在安全防盗、人流监控、医疗健康、交通监管和灾害预警等领域获得广泛的应用。^[6-11]

通过压力传感器的接触式定位方法来实现物体的定位失踪是现有定位示踪的主要方式之一。^[12]一般说来主要工作原理依靠外部的压力引发机械形变并进而通过电容效应、压阻效应和压电效应等改变所测量的电学信号。^[13-15]随着人机交互的应用场景越来越广泛,传统的基于硅,镓等半导体材料的传感器件由于材料质地硬,以及因制作工艺限制很难实现大面积制作等问题,无法满足在可穿戴电子设备,智能家居,医疗健康等应用场景中出现的在不规则表面使用的柔性需求和阵列化排布出现的大尺寸需求。^[16-21]

为了解决这些问题,柔性传感器应运而生。柔性传感器通常由柔性材料制作而成,具有很好的柔韧性,能够根据被测物体的形状改变器件形态,实现不规则物体表面全覆盖。^[16]此外,柔性传感器件制作的工艺相对传统的基于硅,镓等半导体材料的传感器件而言要简单,阵列化排布和大面积制作要容易实现。此外,柔性传感器件的结构可调性高,能够根据使用场景的需求灵活的做出调整 and 改变。因而,柔性传感器件极大的吸引了研究者的注意,越来越多的学者投入到柔性传感器件的研究中来。^[17-22]

1.2 柔性传感器件的研究进展

过去的几十年内,研究者们开发并报道了多种柔性传感器件,这些报道的柔性传感器件的工作原理主要分为三种,分别为基于电容原理、压阻原理和压电原理的柔性传感器件。^[23-25]

1.2.1 基于电容原理的柔性传感器件

基于电容原理的柔性传感器件的工作原理是基于公式(1.1):

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1.1)$$

其中, ϵ_0 表示真空介电常数, ϵ_r 表示相对介电常数, A 表示电极面积, 而 d 表示电极之间的距离。^[26] 式中 ϵ_r , A 和 d 均可随施加在传感器件上的应力的变化而变化, d 通常用来检测压力, A 通常用于检测剪切力, 而 ϵ_r 通常用于特定材料对力的检测。基于电容原理的柔性传感器件主要的优点是传感器件的结构性影响因子少, 并且这些影响因子能够通过式(1.1)统一起来, 这大大简化了传感器件的结构设计和分析。基于电容原理的柔性传感器件对静态应力响应非常敏感, 并且具有较大的响应区间, 同时, 这类传感器的功耗通常很低。

Lipomi DJ 等^[27]报道了一种三明治结构的透明可拉伸电容传感器, 如图 1-1 所示, 该传感器件用脂肪族芳香族无规共聚酯(Ecoflex)作为介电层材料, 用碳纳米管(CNT)和聚二甲基硅氧烷(PDMS)制作成可拉伸的电极材料。由于 Ecoflex 是一种低模量的高分子材料, 当有压力施加在传感器件上时, Ecoflex 会在压力的作用下发生形变, 相应的电极之间的距离将发生改变, 从而导致传感器件的电容 C 发生变化。通过检测传感器件输出信号的变化, 最终实现对施加压力的检测。

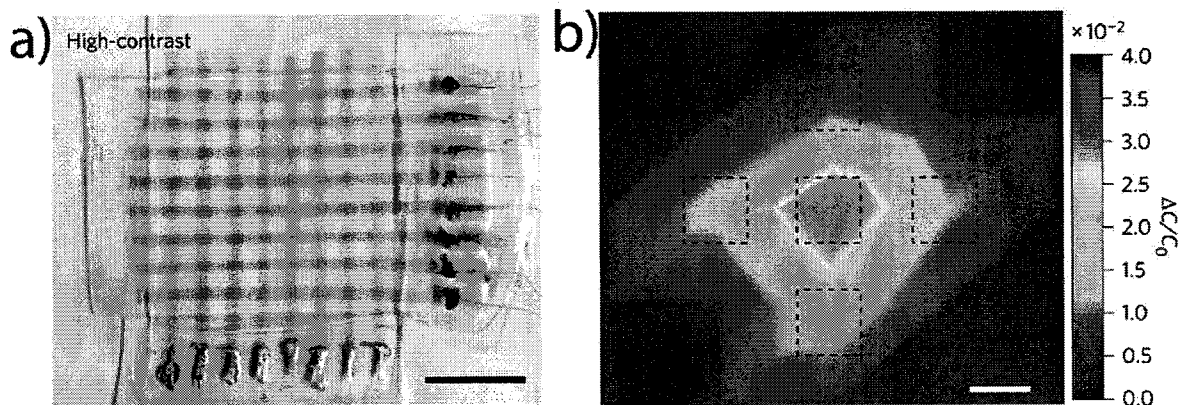


图 1-1 基于电容原理的透明可拉伸传感器件 (a) 传感器件的照片, (b) 传感器件的测试结果

Figure1-1 Stretchable and transparent Capacitive sensor

对于使用弹性体作为介电层材料的基于电容原理的传感器件, 传感器件的灵敏度和响应时间与弹性体自身的粘弹性和抗压性有关。Mannsfeld SCB 等^[28]报道了一种基于 PDMS 弹性体的电容传感器。为了提高电容传感器的灵敏度, 降低传感器的响应

时间, Mannsfeld SCB 等在 PDMS 材料表面引入了金字塔微结构, 制作的电容传感器能够感知传感器上放置的苍蝇, 在放置苍蝇和取走苍蝇的过程中, 传感器几乎是瞬时响应。

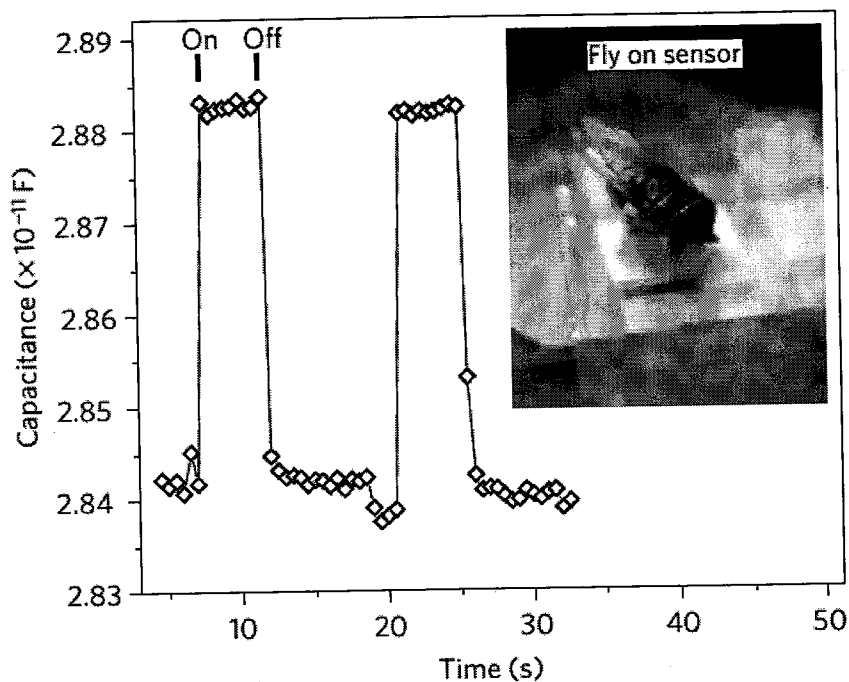
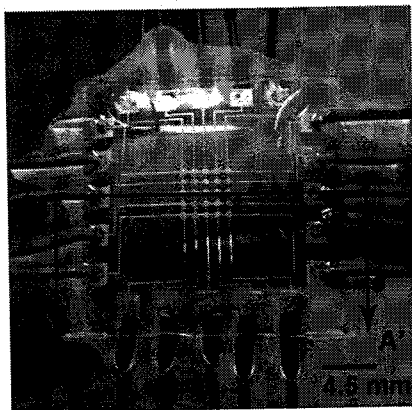


图 1-2 电容传感器的灵敏度和响应时间表征

Figure1-2 Characterization of the sensitivity and response time of the capacitive sensor

A) Sensor prototype on human finger



B) Layout of microchannels

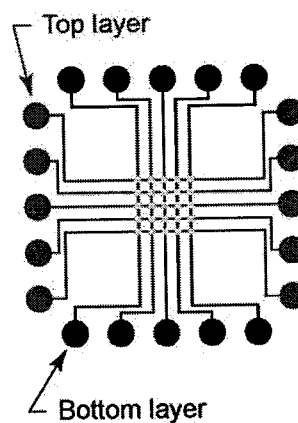


图 1-3 基于微流体介电层的电容传感器照片及结构

Figure 1-3 Picture and Structure of the microfluidic based capacitive sensor

为了提高器件灵敏度, 通常选用弹性模量较小的材料作为介电层材料。Wong RDP 等^[29]报道了一种基于微流体介电层的电容传感器, 该传感器采用 PDMS 构筑微流体

通道，以液态金属汞为流体材料，制作完成的传感器如图 1-3 所示，该传感器具有非常高的灵敏度，当把该传感器包覆在手指上时，手指轻轻弯曲传感器件即有响应。

然而，由于电容 C 与电极面积 A 成正比例关系，在基于电容原理的柔性传感器件微型化过程中，传感尺寸的缩小的同时也降低了传感器件的电容 C ，随之带来的是传感器件输出信号的信噪比也降低了。此外，基于电容原理的柔性传感器件也非常容易受到外界的干扰。

1.2.2 基于压阻原理的柔性传感器件

当外力施加在基于压阻原理的柔性传感器件上时，传感器件通过将力的变化转换为器件阻值的变化从而实现力的测量和表征。材料的阻值可以通过式(1.2)计算得到：

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1.2)$$

这里， ρ 表示材料的电阻率， L 表示材料的长度， A 表示材料的截面积。当 ρ 保持不变时，当外力施加在压阻材料上，压阻材料的 L 和 A 将会发生变化，这时材料几何尺寸的变化是材料电阻发生变化的主要影响因素。

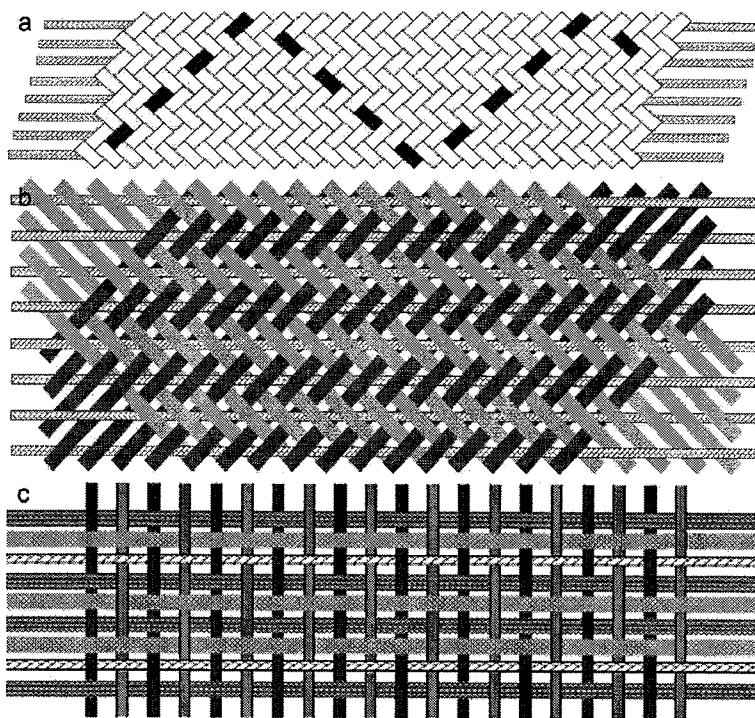


图 1-4 压阻传感器的三种织物结构

Figure 1-4 3 types of the webbing based piezoresistive sensor structure

基于压阻原理的柔性传感器件由于结构简单，信号读取方便，因此关于这类传感

器件的研究报道也最多。Shyr TW 等^[30]研究了织物结构对压阻传感器性能的影响，考察了该传感器在 30% 伸长率下传感器阻值与应力之间的关系。如图 1-4 所示，结果显示，带状基本单元组成织物的方式显著的影响着传感器的性能。带状单元之间的摩擦越小，传感器的响应速度越快。

Yamada T 等^[31]报道了一种基于单壁碳纳米管薄膜的可拉伸压阻传感器，报道的传感器拉伸率达到了 280%，是当时有报道的最好的可拉伸压阻传感器的 50 倍。同时，Yamada T 将该传感器应用于动作识别，不仅能够对说话时声带的震动，同时也很好的识别了手指摆出的各种姿势。

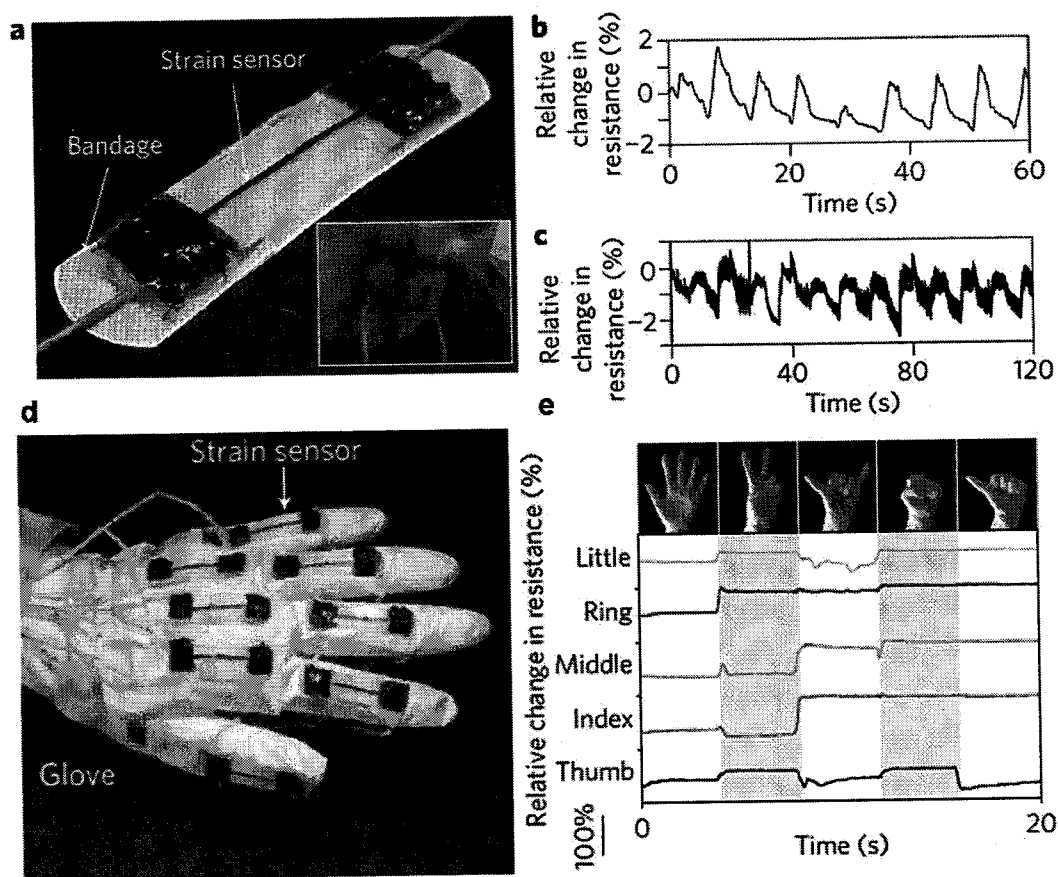


图 1-5 基于单壁碳纳米管薄膜的可拉伸压阻传感器的应用展示

Figure 1-5 Demonstration of the SWNT-film based stretchable piezoresistive sensor

Park M 等^[32]报道了一种基于 MWCNT/PEO 复合材料薄膜的压阻传感器，如图 1-6 所示，Park M 等研究了多壁碳纳米管(MWCNT)的含量对压阻传感器性能的影响，并建立了 MWCNT 含量与电阻变化之间的解释模型，展示了该压阻传感器在嵌入式传感系统中的应用前景。

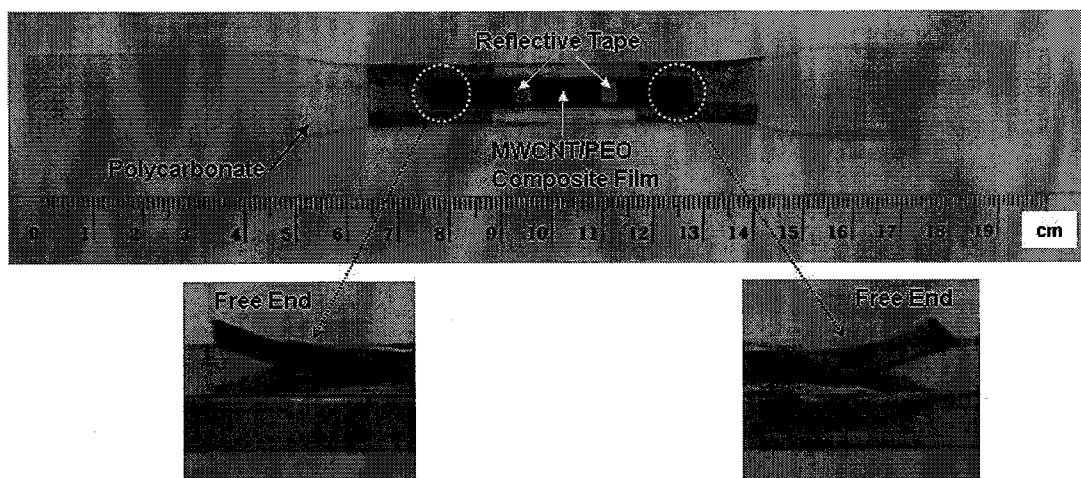


图 1-6 基于 MWCNT/PEO 复合材料薄膜的压阻传感器

Figure 1-6 MWCNT/PEO composite film based piezoresistive sensor

1.2.3 基于压电原理的柔性传感器件

当具有压电性的材料受到力的作用时,材料中偶极子的长度和间距将会发生变化导致材料极化,从而使得材料两端表面带有等量的相反电荷,在材料两端产生电势差,当材料两端接入电极时,将会在两端电极上测量到电压信号。^[32]通常用压电常数 d_{33} 来衡量材料将法向力转换为电荷的能力。^[34]

Wang YR 等^[35]报道了一种基于聚偏氟乙烯(PVDF)织物结构的柔性压电传感器。如图 1-7 所示,该传感器的结构是典型的三明治结构,上下层为电极层,中间利用静电纺丝获得了织物结构的 PVDF 压电层。制作的传感器具有非常优异的柔性和透气性,并且有非常高的灵敏度,有望应用于血压监测,心率监测等健康监护领域。

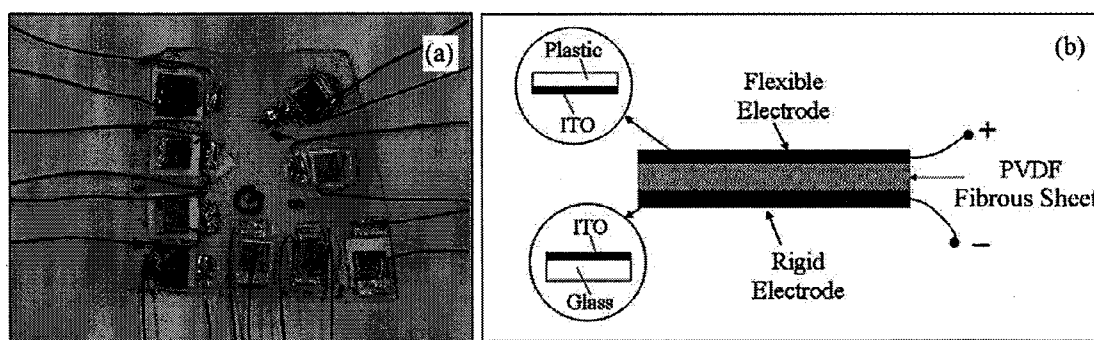


图 1-7 基于 PVDF 织物结构的柔性压电传感器

Figure 1-7 PVDF fabric based flexible piezoelectric sensor

Gullapalli H 等^[36]报道了一种基于压电纳米材料的柔性压电传感器件,如图 1-8 所示。

在器件制作时,通过溶剂热法将氧化锌(ZnO)纳米颗粒嵌入纸中获得了纸基纳米颗粒压电层材料。制作完成的压电器件对静态力和动态力均有非常好的响应。该研究创新性的展现了一种将压电材料颗粒嵌入柔性基底中从而得到柔性传感器件方法。

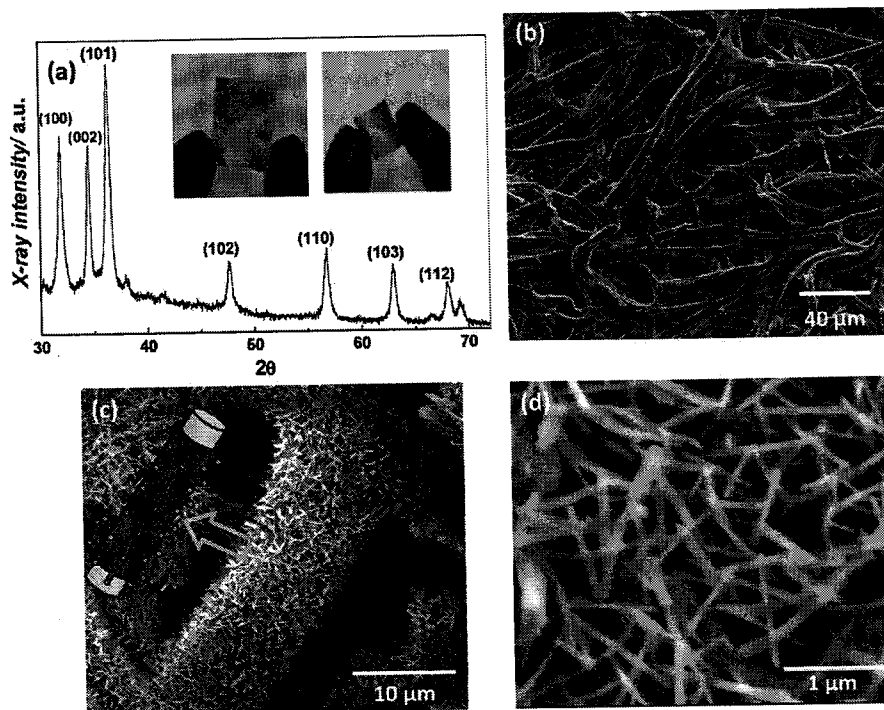


图 1-8 基于压电纳米材料的柔性压电传感器件

Figure 1-8 ZnO-paper nanocomposite based flexible piezoelectric sensor

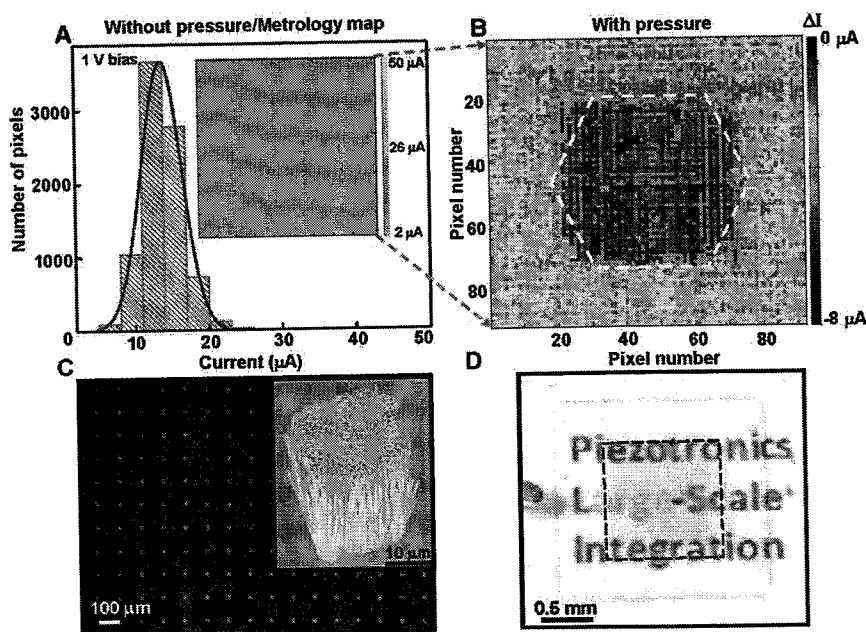


图 1-9 基于氧化锌纳米线阵列的压电传感器及其应用展示

Figure 1-9 Pictures and Demonstrations of the ZnO nanowire based piezoelectric sensor

Wu WZ 等^[37]研究了基于 ZnO 纳米线阵列的压电传感器,该压电传感器利用 ZnO 受力产生的压电势作为栅极电压调控传感阵列信号输出幅值,获得了可独立寻址的二维传感阵列。制作的压电传感器的分辨率达到了 234 tpi,同时展示了该传感阵列在高分辨图像采集方面的应用。

然而,基于压电原理的柔性传感器件的响应随时间会出现漂移,因此应用于静态传感时会导致结果不可靠。

虽然上述三种传感器件基于不同的物理效应,但一般说来主要工作原理是依靠外部的压力引发机械形变并进而通过电容效应、压阻效应和压电效应等改变所测量的电学信号。这些传感器件的局限性主要有以下几点:

(1) 传感器工作时须供电,基于电容效应、压阻效应和压电效应等的压力传感器为无源传感器,工作时依靠外部压力引发的机械形变改变加载在传感器两端的电压或者电流信号,以实现机械信号向电信号的转变;^[38, 39]

(2) 基于电容效应、压电效应实现传感功能的器件工作时对环境要求高,信号处理电路复杂;同时由于制作工艺的限制,这些传感器无法用于大面积连续采集信号;^[41]

(3) 基于压阻效应实现机械信号转换为电信号的传感器件严重依赖压阻材料自身的特性,压阻材料阻值是否均一对器件探测结果影响较大;同时工作时材料需要反复产生机械形变,材料使用的寿命有限。^[42, 43]

1.3 接触起电效应的研究进展

接触起电效应是一种由接触引发的带电效应,也是最广泛的静电起电效应之一。^[44]接触起电发生在两种材料之间的接触-分离过程中,当一种材料与另外一种材料接触时,在两种接触的材料表面将会发生电荷的转移,并且这种转移的电荷能够长时间的驻留在材料的表面。材料表面所带电荷的符号取决于该材料和与该材料接触的另外一种材料之间的相对极性。^[45, 46]表 1 列出了常见的材料之间的相对极性的排序。^[47]在该表中,越是排在底部,序列越是靠后的材料表面富集电子的能力越强,越是排在顶部,排名越是靠前的材料表面失去电子的能力越强。因此当位于底部序列的材料和位于顶部序列的材料之间接触时,位于底部序列的材料表面将会带有负电荷,相应的位于顶部序列的材料表面将会带上正电荷。

Positive ↑	Polyformaldehyde 1.3-1.4	(continued)	Negative ↓
	Etylcellulose	Polyester (Dacron)	
	Polyamide 11	Polyisobutylene	
	Polyamide 6-6	Polyurethane flexible sponge	
	Melanime formol	Polyethylene Terephthalate	
	Wool, knitted	Polyvinyl butyral	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Aluminum	Natural rubber	
	paper	Polyacrylonitrile	
	Cotton, woven	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Steel	Polybisphenol carbonate	
	Wood	Polychloroether	
	Hard rubber	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Nickel, copper	Polystyrene	
	Sulfur	Polyethylene	
	Brass, silver	Polypropylene	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	Polyvinyl alcohol	Polydimethylsiloxane (PDMS)	
	(continued)	Polytetrafluoroethylene (Teflon)	
Positive ↑	Aniline-formol resin	Polyvinyl alcohol	Negative ↓
	Polyformaldehyde 1.3-1.4	Polyester (Dacron) (PET)	
	Etylcellulose	Polyisobutylene	
	Polyamide 11	Polyurethane flexible sponge	
	Polyamide 6-6	Polyethylene terephthalate	
	Melanime formol	Polyvinyl butyral	
	Wool, knitted	Formo-phenolique, hardened	
	Silk, woven	Polychlorobutadiene	
	Polyethylene glycol succinate	Butadiene-acrylonitrile copolymer	
	Cellulose	Nature rubber	
	Cellulose acetate	Polyacrylonitrile	
	Polyethylene glycol adipate	Acrylonitrile-vinyl chloride	
	Polydiallyl phthalate	Polybisphenol carbonate	
	Cellulose (regenerated) sponge	Polychloroether	
	Cotton, woven	Polyvinylidene chloride (Saran)	
	Polyurethane elastomer	Poly(2,6-dimethyl polyphenyleneoxide)	
	Styrene-acrylonitrile copolymer	Polystyrene	
	Styrene-butadiene copolymer	Polyethylene	
	Wood	Polypropylene	
	Hard rubber	Polydiphenyl propane carbonate	
	Acetate, Rayon	Polyimide (Kapton)	
	Polymethyl methacrylate (Lucite)	Polyethylene terephthalate	
	Polyvinyl alcohol	Polyvinyl Chloride (PVC)	
	(continued)	Polytrifluorochloroethylene	
		Polytetrafluoroethylene (Teflon)	

表 1-1 常见的材料之间的相对极性的排序

Table 1-1 Triboelectric series for some common materials following a tendency to easily lose electrons (positive) and to gain electrons (negative).

1.3.1 接触起电效应在摩擦纳米发电机中的应用

2012 年王中林研究组首次提出了基于接触起电和静电感应耦合的摩擦纳米发电机，^[48]该发电机基于两层高分子薄膜材料，当材料接触分离或者相对运动时，由于摩擦起电效应，两种材料之间将产生转移电荷并且形成电势差，如果在高分子薄膜材料接触面的背面引入电极，并且将引入的电极短路或者接入负载，由于静电耦合效应，引入的电极之间将会有电子的流动，从而将不规则的机械能转换为电能。

1.3.2 摩擦纳米发电机的四种结构

由于摩擦纳米发电机具有输出性能高、制备工艺简单、器件结构可调性高、材料选择范围广的特点，越来越多的研究人员参与到摩擦纳米发电机的研究中来，取得了一系列的成果。基于对摩擦纳米发电机的深入研究，目前已经开发出了摩擦纳米发电

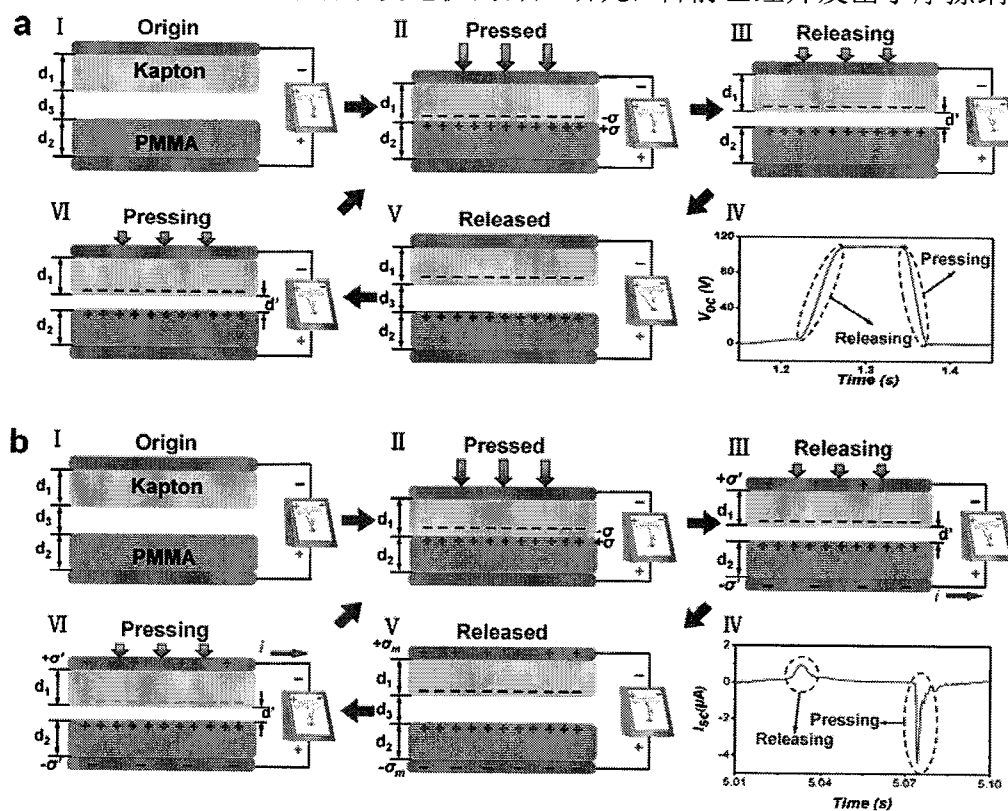


图 1-10 垂直接触-分离模式的摩擦纳米发电机

Figure 1-10 Vertical contact-separation mode

机的四种工作模式。Zhu G 等^[49]报道了垂直接触-分离模式的摩擦纳米发电机，如图 1-10 所示。这种结构的摩擦纳米发电机能够有效的将环境中的机械能转换为电能，并且瞬时输出功率达到了 31.2 mW/cm^2 ，开路电压达到了 110 V 。Wang SH 等^[50]在垂直接触-分离模式摩擦纳米发电机的基础上，对接触的高分子材料进行了表面修饰，在

材料表面引入了微结构，将摩擦纳米发电机开路电压进一步提高至 230 V，摩擦纳米发电机的能量体密度达到了 128 mW/cm^3 。

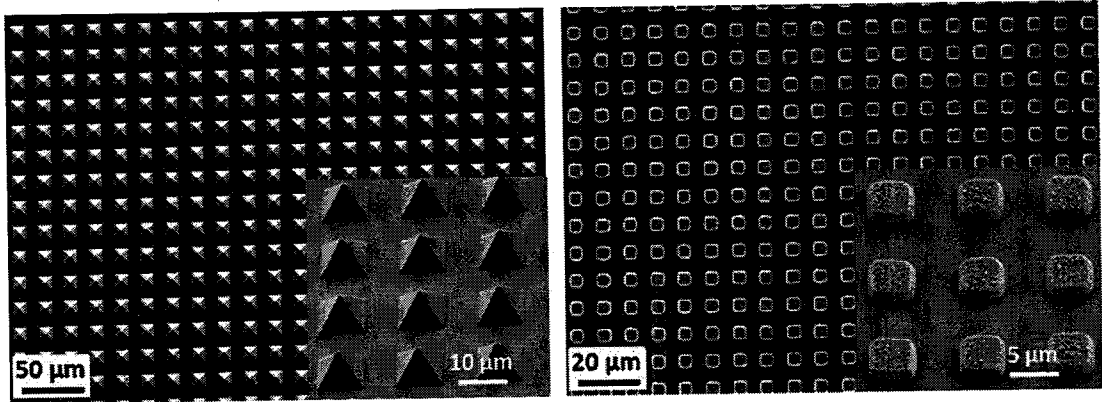


图 1-11 材料表面微结构的 SEM 图

Figure 1-11 SEM pictures of the surface micro-structure on the electrification material

Wang SH 等^[51]将两块材料的相对运动由垂直接触-分离变为沿着表面平行的方向相对滑移，提出了水平滑动模式的摩擦纳米发电机。基于该结构的摩擦纳米发电机电压输出提高至 $\sim 1300 \text{ V}$ ，短路电流密度达到了 4.1 mA/cm^2 ，并且能够同时点亮数百盏发光二极管(LED)。

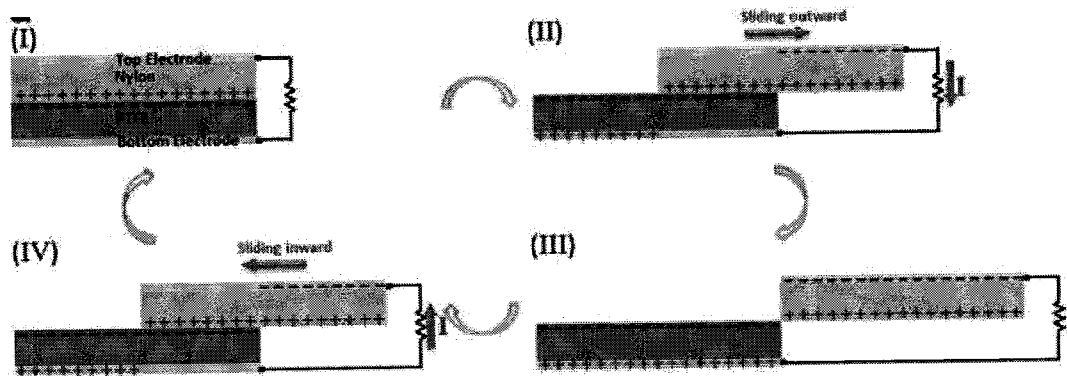


图 1-12 水平滑动模式的摩擦纳米发电机

Figure 1-12 Contact-sliding mode

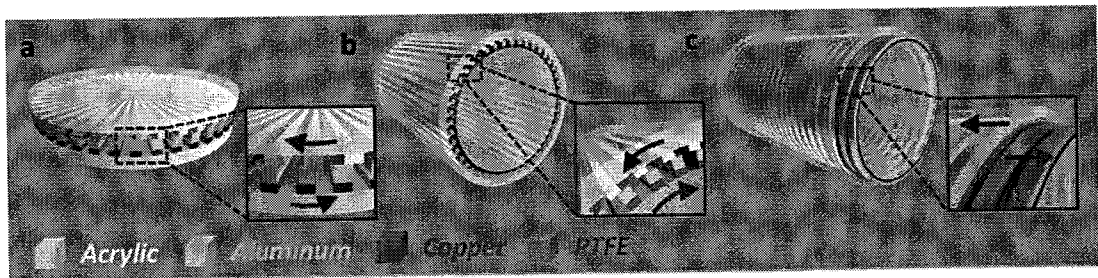


图 1-13 图案化电极设计的摩擦纳米发电机

Figure 1-13 Patterned electrode layer design

Zhu G 等^[52]在水平滑动模式的摩擦发电机的基础上，利用金属与摩擦层直接接触，并且对摩擦纳米发电机的电极进行了图案化设计，有效的提高了接触面的利用效率，进一步提高了摩擦纳米发电机的输出。

基于垂直接触-分离模式和水平滑动模式的摩擦纳米发电机在工作时得将两个电极连接到负载上，然而在某些情况下，比如人在路上行走，并不方便将电极连接到负载上。为了这些场景下摩擦纳米发电机的应用问题，Yang Y 等^[53]提出了一种单电极模式的摩擦纳米发电机。通过将上下电极组合成一个整体，这种结构设计的摩擦纳米发电机只需要引出一根引线，将原本在两个电极之间电荷转移转变为电极与地之间的电荷转移，有效的解决了应用在诸如人走路等场景下摩擦纳米发电机存在的问题。

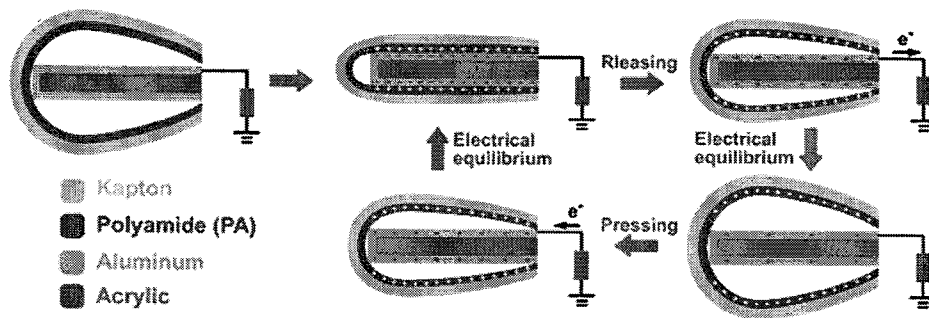


图 1-14 单电极模式的摩擦纳米发电机

Figure 1-14 Single-electrode mode with curved surface

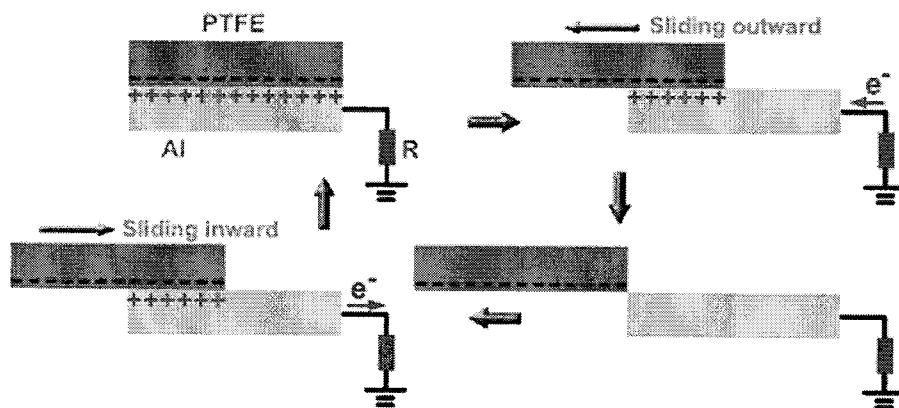


图 1-15 平面式单电极模式的摩擦纳米发电机

Figure 1-15 Single-electrode mode with plain surface

进一步的，Yang Y 等^[54]在此单电极模式的基础上进一步的开发出了平面式的单电极模式摩擦纳米发电机，如图 1-15 所示，这种平面式的单电极式摩擦纳米发电机不仅能够感知传感器件是否被接触，同时还能感知是否有物体在传感器件表面滑动。此外，平面式的单电极式摩擦纳米发电机的输出能够达到 1100 V，短路电流密度可以

达到 6 mA/cm^2 ，在负载为 $100 \text{ M}\Omega$ 时平面式的单电极式摩擦纳米发电机的最大输出功率可以高达 350 mW/cm^2 ，能够同时点亮 100 盏 LED。

无论是垂直接触-分离模式，还是水平滑动模式，或者单电极模式，摩擦纳米发电机在工作时都需要持续不断的接触。对摩擦纳米发电机深入研究后发现，持续不断的接触会让材料表面的电荷密度达到饱和，而产生静电荷会在材料表面保留至少好几个小时，而这段时间材料并不需要持续的接触，基于此，Wang SH 等^[55]提出了独立层模式的摩擦纳米发电机，如图 1-16 所示。通过将两个电极接入负载，带电物体在两个电极表面之间来回滑动或者移动时，两个电极之间将会产生电势差，产生的电势差将驱动电子通过连接的负载在两个电极之间来回流动，从而形成功率输出。

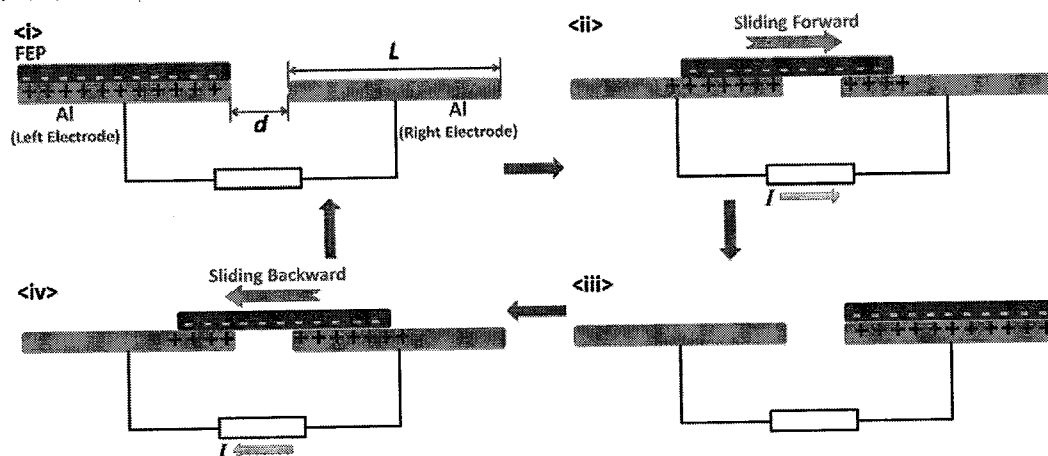


图 1-16 独立层模式的摩擦纳米发电机

Figure 1-16 Freestanding triboelectric-layer mode

1.4 摩擦纳米发电机在柔性传感方面应用的研究现状

利用摩擦纳米发电机将触碰、按压等机械信号转换为电信号以实现触碰、按压的感知是基于摩擦纳米发电机的传感器件单元工作的核心原理。通过对传感单元进行阵列化的结构设计，可实现对接触物体的位置、应力等信息的采集和识别，实现物体位置的实时追踪以及接触图案的还原。目前，摩擦纳米发电机在传感方面的应用已经逐步开展，在材料优化、结构设计、信号处理等方面的应用已经取得一定的结果。

1.4.1 基于摩擦纳米发电机的单个传感单元

Zhu 等^[57]用 ICP 方法在氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)表面刻蚀出纳米线获得灵敏度达到 44 mV/Pa 的摩擦纳米发电机传感器，在 $<0.15 \text{ KPa}$ 的极低压区域中最大响应能够

达到 1.1 V/Pa。同时, Zhu 等搭建了配以信号处理电路的单个摩擦纳米发电机 传感识别系统, 并展示了其在监护、自动控制、安防等领域的应用。

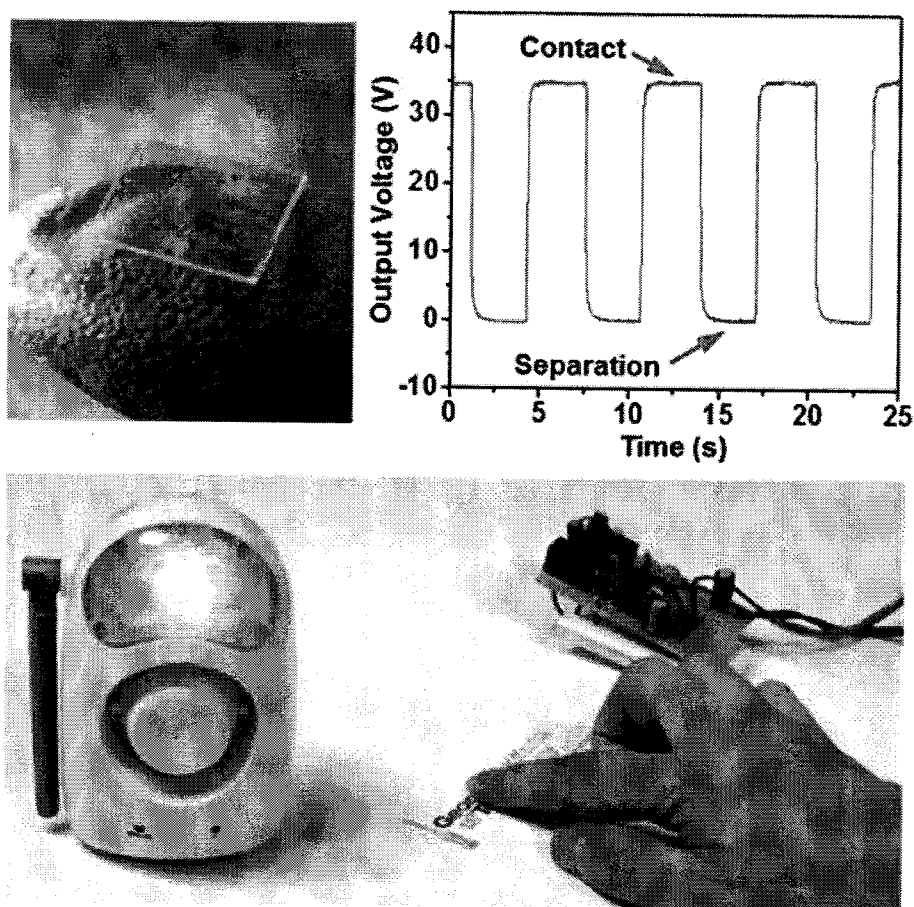


图 1-17 超薄摩擦纳米发电机传感器及配以信号处理电路的报警系统

Figure 1-17 Demonstration of ultrathin triboelectric sensor based alarm system

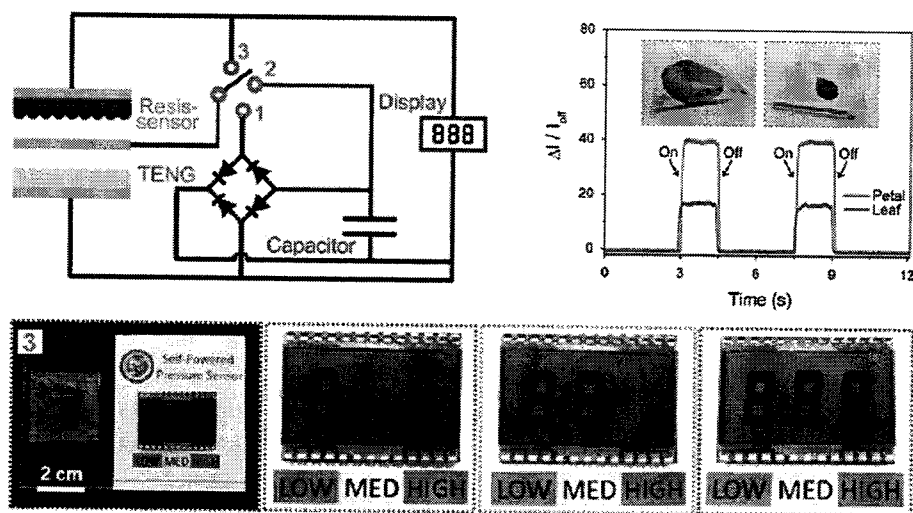


图 1-18 超灵敏压力测试系统及其应用展示

Figure 1-18 Picture and demonstration of the ultrasensitive pressure sensing system

Luo JJ 等^[58]报道了一种基于接触分离模式摩擦纳米发电机的超灵敏压力测试系统, 该系统由一个接触分离式摩擦纳米发电机, 一个超灵敏压力传感器, 储能电路以及一块显示屏。组成, 在测试时先用接触分离式摩擦纳米发电机为储能电路充电, 随后再用储能电路为超灵敏压力传感器供电。使用的超灵敏压力传感器能够识别出放置在传感器上放置的花瓣和树叶, 分辨率低至 0.2 Pa。搭建的超灵敏压力测试系统图像化显示受到压力的大小, 展示了其在智能传感中应用的潜力。

1.4.2 基于摩擦纳米发电机的传感阵列

Yang 等^[59]利用模压方法在聚二甲基硅氧烷(PDMS)表面制备金字塔结构, 以此增加工作时摩擦接触面积, 提高摩擦纳米发电机输出。结果表明, 此摩擦纳米发电机能

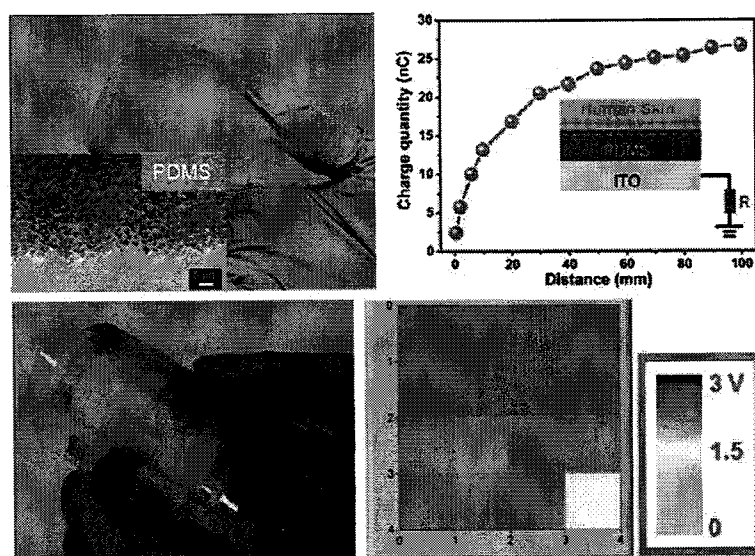


图 1-19 利用 PDMS 材料制备的摩擦纳米发电机传感器

Figure 1-19 PDMS based TENG

够输出约 1000V 的开路电压, 接入负载为 100 MΩ 时功率密度为 500 mW/m²。同时, Yang 等将该摩擦纳米发电机制作成单位大小为 3×3 cm² 的矩阵, 将每个矩阵单元分别接入测量设备, 并展示了制作的传感阵列在追踪位置和感知压力方面的应用。制作的传感阵列能够较好的识别出按压的位置, 对压力的感知能力约为 0.29±0.02 mV/Pa。

Liang QJ 等^[60]用压印方法在聚四氟乙烯(PTFE)表面制备了微结构来提高摩擦纳米发电机的输出并将摩擦纳米发电机阵列化实时探测震动。结果表明, 制作的摩擦纳米发电机传感阵列能够感知 0~60 Hz 的震动, 感知结果非常准确(相对错误率低于 0.42%), 并且工作非常稳定, 在 10000 次循环后没观察到明显的信号输出衰减。

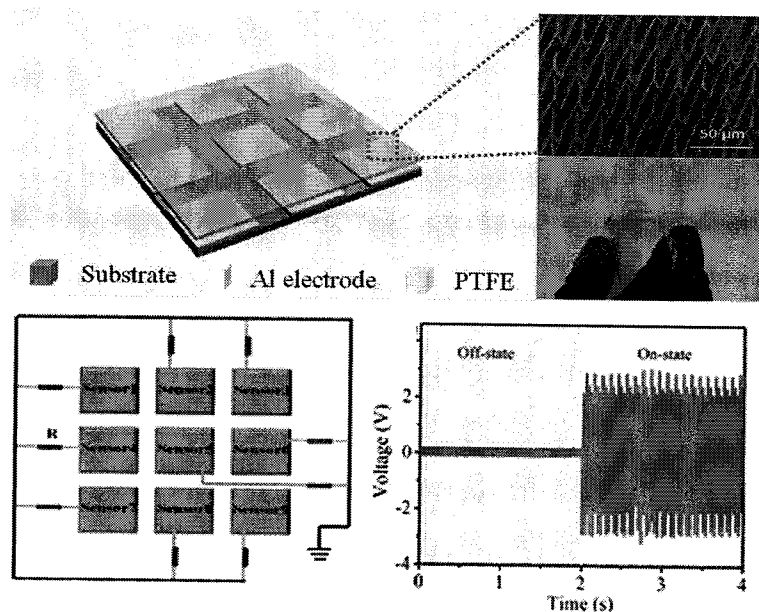


图 1-20 PTFE 制备的摩擦纳米发电机传感器阵列及在震动探测方面的应用

Figure 1-20 Picture and demonstration of the reported TENG

Chen J 等^[61]发明了一种基于单电极模式摩擦纳米发电机的自驱动智能键盘。

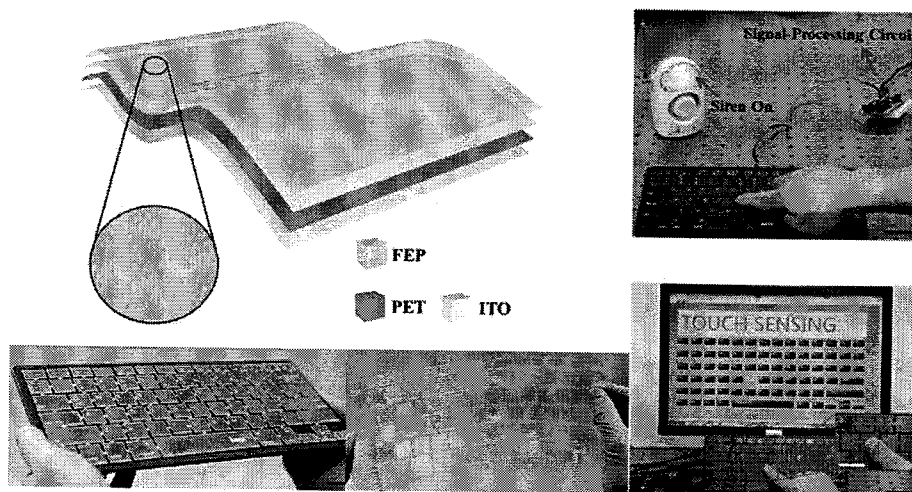


图 1-21 基于单电极模式摩擦纳米发电机的自驱动智能键盘

Figure 1-21 Self-powered keyboard consisted of single-electrode mode based TENG

该工作将单电极模式摩擦纳米发电机组按照键盘的排布方式组成阵列，并将每一个摩擦纳米发电机单独引出一根信号传输通道。该智能键盘不仅能够检测单点按压信息，同时还能够检测出按键的速度以及按键的轨迹。此外，该工作还展示了自驱动智能键盘能够利用敲击时产生的电信号作为触发信号，结合报警电路驱动报警蜂鸣器发出警报声，以及测试不同的人敲击键盘时采集到的信号数据，并借以判断是否是本人使用键盘。这项工作展示了摩擦纳米发电机在安防监控，智能家居等领域的应用前景。

Wang XD 等^[62]设计了一种行列式分布的摩擦纳米发电机传感阵列。这种传感阵

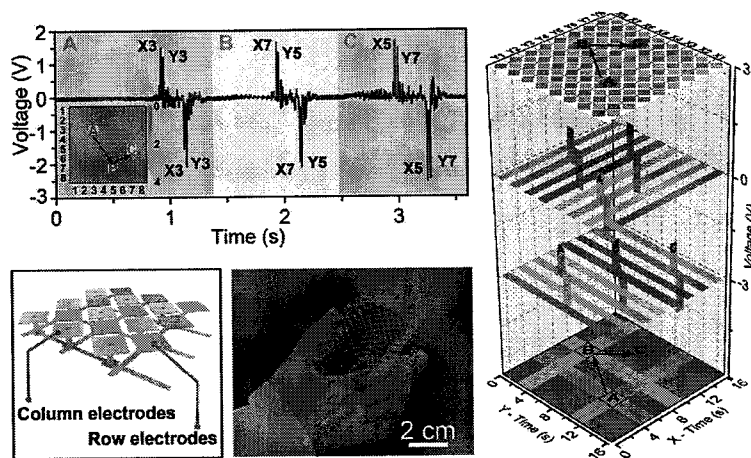


图 1-21 行列分布式摩擦纳米发电机传感器阵列

Figure 1-21 TENG based sensor array consisted of bit electrode line and word electrode lines

列的布线方式由 $m \times n$ 个点布 $m \times n$ 条线的方式变为 $m+n$ 条线的方式，有效的减少了传感器件的信号传输通道数目，优化了传感器件的结构设计，为后续摩擦纳米发电机在传感领域的研究提供了参考。

1.5 本文的选题思想和主要内容

摩擦发电机具有输出性能高、制备工艺简单、器件结构可调性高、材料选择范围广的特点使得其应用在传感领域中有天然的优势。首先，摩擦纳米发电机能够将机械能直接转换为电能，应用于传感领域中，将摩擦纳米发电机从机械信号转换而来的电信号直接用于信号识别，能够从根本上解决传感节点需要供电的问题，实现传感节点真正的长期工作，不再有传感节点因为失去能量供给而停止工作的担忧，能够进一步丰富传感器的应用场景；其次，摩擦纳米发电机制备工艺简单，器件结构可调性高，应用在传感领域能够有效的降低传感器件的制造工艺难度和制作成本；再者，摩擦纳米发电机材料选择范围广，器件可以全部用高分子材料制作而成，能够真正实现传感器件的柔性、超薄，能够将传感器件应用于凹凸不平的表面，丰富了传感器件的应用场景。

然而，现有摩擦纳米发电机用于传感方面仍然存在以下几个方面的问题：

(1) 比较缺乏传感单元和阵列结构的设计。基于摩擦纳米发电机的传感单元和阵列多是基于四种摩擦纳米发电机结构的简单排布和堆叠，传感器件结构较为简单，信

号串扰严重，导致信号处理结果错误率较高。[63-65]

(2) 传感器件信号的采集和处理尚未有系统集成方面的报道，目前传感器件的信号采集和处理依赖高精度的测量设备，这种信号处理方式严重制约了传感器件的应用。如何将信号采集和处理从高精度的测量设备走向定制化的信号处理电路是传感器件走向应用必须解决的问题。[66-69]

本文拟通过研究基于摩擦起电和静电耦合效应，实现传感器件自供电、零功耗，建立一种机械信号转换为电信号的新途径；以该途径为基础，通过器件单元和阵列结构设计，降低电极之间的静电感应交叉干扰，以实现极低的器件内部信号串行干扰；在该单元和阵列结构基础上，构筑柔性自供电触控传感阵列，对传感阵列配以用于信号采集的信号采集电路和用于信号处理和器件应用展示的识别软件，以实现器件应用于位置识别、图像采集等方面的系统集成，使之能实时的显示出物体的形貌、位置、运动轨迹和运动参数信息，展示其在定位示踪、安防监控、健康监护等领域中的潜在应用。

本论文围绕传感阵列信号干扰抑制这一核心问题，对基于接触起电和静电感应耦合原理的自驱动传感单元和阵列结构进行了深入、系统的研究，具体工作如下：

(1) 从基于接触起电和静电感应耦合原理的摩擦纳米发电机原理出发，从结构设计和信号产生原理等方面介绍和比较接触分离式柔性传感器件和单电极式柔性传感器件，确定单电极式柔性传感器件作为柔性传感器件和阵列的单元结构设计方案；

(2) 在单电极式单元结构设计的基础上，设计并研究三种单电极式柔性传感单元结构和四种传感单元阵列排布方式，并从抗干扰性、信号质量、制作工艺及空间利用效率等方面考察设计的三种单元结构和四种传感单元阵列排布方式，选择带有屏蔽层的相互嵌套式的单电极式柔性传感器件单元和阵列作为柔性传感器件和阵列的设计方案；

(3) 利用有限元分析软件对带有屏蔽层的相互嵌套式单电极式柔性传感器件单元和阵列结构进行深入研究，考察屏蔽层、传感单元相对尺寸等对柔性薄膜传感阵列的信号输出的影响，定量评价引入的屏蔽层对于干扰信号的抑制效果，并获得相互嵌套式传感单元的最佳结构设计；

(4) 以有限元分析的结果为基础，设计并制作大面积自驱动柔性触觉传感阵列，测量大面积自驱动柔性触觉传感阵列在单点触碰、多点触碰情况下的信号输出幅值，

验证大面积自驱动柔性触觉传感阵列应用的可行性；

(5) 为满足高分辨率场景下的应用需求，设计并制作高分辨率相互嵌套式自驱动柔性薄膜触觉传感阵列，结合小信号处理电路展示高分辨率相互嵌套式自驱动柔性薄膜触觉传感阵列在单点触碰和物体形貌采集方面的应用；

(6) 结合信号处理电路，展示基于接触起电效应的柔性传感阵列在室内定位，电子签名，轨迹追踪，图案采集等方面的应用。

(7) 基于已经完成的工作，提出基于该结构传感阵列的进一步研究方向，并对可能结合的其他领域提出了建议，为后续工作的研究和开展提供了有力的参考。

第二章 基于接触起电效应的柔性传感器件的工作原理

2.1 前言

本章从理论上阐述基于接触起电效应的柔性传感器件的工作原理,为后续传感器件的结构设计和模拟计算提供支持。

基于接触起电效应的柔性传感器件的原理是利用两种聚合物膜材料,通过摩擦和感应起电,并将产生的电能作为传感器件的输出信号,以用于后续电路或者设备对信号的进一步识别处理。^[70]相对于基于电容、压阻、压电等原理的柔性传感器件,基于接触起电效应的柔性传感器件将摩擦纳米发电机从机械信号转换而来的电信号直接用于信号识别,从根本上解决了传感器件需要供电的问题。此外,基于接触起电效应的柔性传感器件的结构可调性高,器件制作工艺难度和成本较低。再者,基于接触起电效应的柔性传感器件材料选择范围广,器件可以全部用高分子材料制作而成,能够真正实现传感器件的柔性、超薄,可以应用于凹凸不平的表面,丰富了传感器件的应用场景。

在本章中,我们对基于接触起电效应的柔性传感器件的工作原理进行详尽的阐述,从结构设计和信号产生原理两个方面介绍了接触分离式柔性传感器件和单电极式柔性传感器件。通过对两种结构的传感器件进行比较,相对于接触分离式柔性传感器件的两层结构,单电极式柔性传感器件只需要接触分离式柔性传感器件的一侧结构,因此更加轻薄。在超薄、高分辨率等要求下,单电极式柔性传感器件遇到的器件结构设计、制作工艺等难度要远低于接触分离式柔性传感器件,因而在柔性传感器件的应用方面有更大的优势和更广阔的应用前景,这也为后续的传感器件结构设计提供了重要的方向。

2.2 基于接触起电效应的柔性传感器件的工作原理

2.2.1 接触分离式柔性传感器件

2.2.1.1 接触分离式柔性传感器件的结构

典型的接触分离式柔性传感器件单元的结构如图 2-1 所示,将该传感单元进行阵列化设计,即可组成传感阵列。该传感器件单元由上下两部分组成,每个部分均由聚合物材料层,背电极层和基底层组成。^[71]每个部分的材料层,背电极层和基底层依次

紧紧堆叠在一起。上下两部分中的聚合物层作为摩擦层和起电层，通常由不同的材料构成，在相互接触的过程中，上下部分的聚合物材料由于接触起电效应将会带上摩擦电荷。背电极层作为输出信号的载体，通常由金、银或者铜组成，由于静电耦合效应，背电极上将会产生与聚合物材料符号相反的感应电荷。基底层材料通常为聚酰亚胺薄膜，起到支撑整个器件的作用。上下两个部分之间保持一定的距离，以保证上下两部分能够做到物理上的接触-分离。

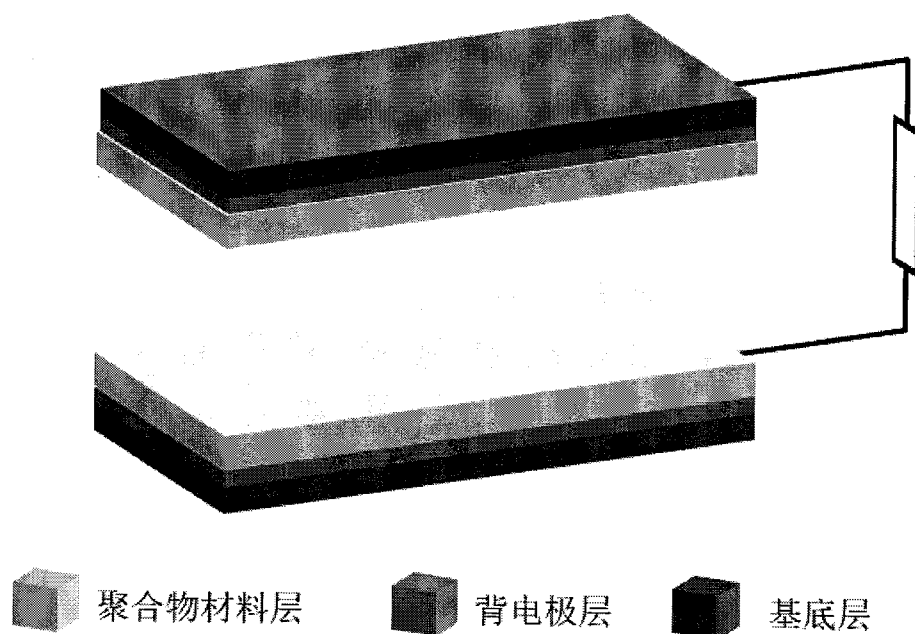


图 2-1 接触分离式柔性传感器件单元结构

Figure 2-1 Illustration of the structure of the contact-separate mode flexible sensing unit

2.2.1.2 接触分离式柔性传感器件的信号产生原理

由摩擦纳米发电机的发电原理得到，不同聚合物材料得失电子的能力不同，在相互接触-分离的过程中，得电子能力相对强的聚合物材料将会得到电子而带负电，得电子能力相对弱的聚合物材料将会失去电子而带正电。在两种带电聚合物材料分离的情况下，两种聚合物材料表面保持带电状态，由于静电耦合效应，带负电的聚合物材料的背电极中将产生感应正电荷，相应地，带正电的聚合物材料的背电极中将产生负电荷。在两种带电聚合物材料接触的情况下，由于两种聚合物材料表面带有等量的正负电荷，当两种聚合物材料接触时，彼此的正负电荷相互抵消，两种聚合物材料背电极中将不再有感应电荷。在接触-分离的过程中，聚合物材料的背电极中产生周期性的感应电荷，将器件单元接入信号采集电路或者信号采集设备时，这种周期性的感应电荷将以

脉冲信号的形式输入信号采集电路或者信号采集设备，从而实现传感的功能。

2.2.2 单电极式柔性传感器件

2.2.2.1 单电极式柔性传感器件的结构

典型的单电极式的传感器件单元如图 2-2 所示，将该传感单元进行阵列化排布，即可得到基于单电极式柔性传感阵列。与接触分离式柔性传感单元不同的是，单电极式柔性传感器件结构上只有接触分离式柔性传感单元的一半，由聚合物材料层，背电极层和基底层组成。^[72]聚合物层材料作为摩擦层和起电层，当有物体与聚合物材料层接触时，聚合物材料表面将会带电，带有电荷的正负性由接触材料和聚合物材料的得失电子能力决定。背电极层同样作为信号传输的载体，通常为金，银或铜等金属。基底层作为支撑整个单元的载体，通常选用聚酰亚胺薄膜、无纺布等具有一定强度的材料。

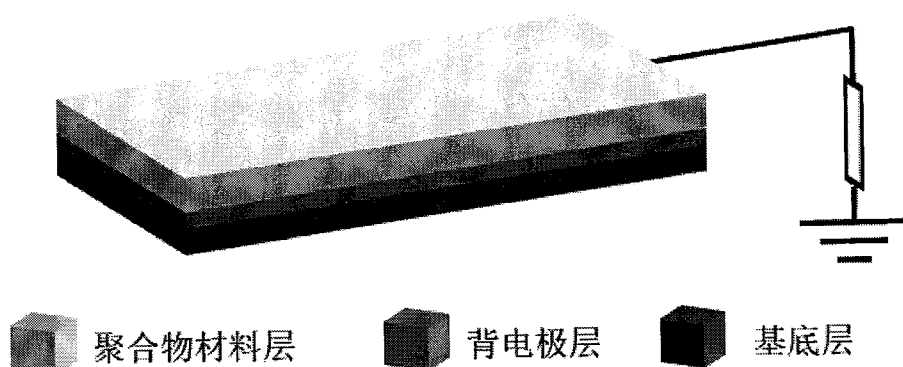


图 2-2 单电极式的传感器件单元结构

Figure 2-2 Illustration of the structure of the single-electrode mode flexible sensing unit

2.2.2.2 单电极式柔性传感器件的信号产生原理

接触分离式传感器件单元的起电层和摩擦层是两种固定的聚合物材料，而单电极式传感器件单元的起电层和摩擦层是一种固定的聚合物材料和可变的接触物体。当接触物体与聚合物材料接触时，由摩擦纳米发电机的发电原理可知，该聚合物材料表面和接触物体表面将会产生等量且符号相反的电荷，由于接触时正负电荷相互抵消，因此聚合物材料的背电极中将不会产生感应电荷。当接触物体离开聚合物材料时，聚合物材料表面仍然保持带电状态，相应地，聚合物材料的背电极上将会产生与聚合物材料符号相反的感应电荷。在接触物体与聚合物材料接触-分离的过程中，背电极中将会产生周期性的感应电荷，当器件单元接入信号采集电路或者信号采集设备时，这种

周期性的感应电荷将以脉冲信号的形式输入信号采集电路或者信号采集设备,进而实现传感的功能。

2.3 两种结构的柔性传感器件比较

通过两种结构的柔性传感器件结构和信号产生原理介绍,接触分离式柔性传感器件组成上是固定的两种聚合物材料,相对单电极式柔性传感器件,受测试环境的影响相对较小。但是,相对单电极式柔性传感器件,接触分离式柔性传感器件单元上下部分之间必须存在一定的物理间隔,同时,为了能够达到最佳的输出功率,上下部分在每次的接触-分离过程中需要尽可能的对准接触,器件制作难度比单电极式柔性传感器件大大。此外,接触分离式柔性传感器件在大尺寸大面积阵列化排布和高分辨率阵列设计方面,无论是传感阵列的柔性还是制作工艺的难度都要高于单电极式柔性传感器件。因而,本论文选择单电极式柔性传感器件作为柔性传感器件和阵列的单元结构设计方案。

2.4 本章小结

本章研究和探讨了基于接触起电效应的柔性传感器件的两种结构设计,并详细阐述了接触分离式柔性传感器件和单电极式柔性传感器件的信号产生原理,比较了两种结构在应用于柔性传感器件领域时的优势和不足,认为从器件结构设计、制作工艺难度以及阵列化设计等方面考虑,单电极式柔性传感器件在柔性传感器件的应用方面有更大的优势和更广阔的应用前景,并选择此结构作为后续柔性传感器件和阵列的单元结构设计方案。得到的具体结论如下:

(1)接触分离式柔性传感器件由两部分组成,每部分均由聚合物材料层,背电极层和基底层组成,两部分的聚合物材料通常为两种不同的材料。接触分离式柔性传感器件的起电层和摩擦层为固定的聚合物材料,因而受到测试环境的影响较小。但是接触分离式柔性传感器件的两部分必须存在一定的物理距离,且为了保持最佳的输出功率,上下两部分在接触分离式需要完全对准,因而接触分离式柔性传感器件在大尺寸大规模传感阵列的应用上面临着较大的制作工艺、单元结构和器件阵列化设计的难度。

(2)单电极式柔性传感器件只有接触分离式柔性传感器件的一半结构,在工作时由接触物体材料与单电极式柔性传感器件的起电层材料相互接触-分离而产生摩擦电

荷，相对接触分离式柔性传感器件，单电极式柔性传感器件受测试环境的影响较大。但是单电极式柔性传感器件不存在接触分离式柔性传感器件的对准问题，没有物理距离的限制，因而器件尺寸可以很薄，在器件制作工艺、单元结构和器件阵列化设计方面难度要远低于接触分离式柔性传感器件。

(3)基于两种结构的比较结果，本论文选择单电极式柔性传感器件作为柔性传感器件和阵列的单元结构设计方案。

第三章 基于接触起电效应的柔性传感器件单元和阵列的结构研究

3.1 前言

本章主要对基于接触起电效应的单电极式柔性传感器件单元的结构和阵列进行研究,阐述传感器件单元和阵列的工作原理,并在此基础上设计传感器件单元的结构和阵列排布方式,同时对这些结构和排布方式进行比较,确定柔性传感器件单元的最优结构和阵列排布方式。

柔性传感器件单元是组成传感阵列的基本结构。将基于接触起电效应的简单结构的传感单元阵列化排布会出现传感阵列的有效节点数目远低于传感单元数目,造成有限的阵列器件平面空间的较大浪费。另外每个单元引出一条信号传输通道也会给柔性传感阵列的信号处理带来非常大的挑战,尤其是在大面积高密度情况下。例如,当传感单元以 60 行 60 列排布时,传感单元个数达到了 3600 个,相应地信号传输通道达到 3600 条,这大大的增加柔性传感器件的信号处理难度和复杂程度。而通过对传感单元进行结构设计,将两个甚至多个传感单元集成到一起,实现每个传感单元都能够作为一个有效的阵列传感节点,这大大提高了阵列器件平面空间的利用率,使得有限的空间内能够容纳更多的传感单元。此外,对传感单元进行阵列化排布设计,例如每行每列的传感单元共用一条信号传输通道,这种方式将极大的减少了阵列化排布引出的信号传输通道数目,降低了信号处理的复杂程度和难度。再者,传感单元阵列化排布时也面临传感单元信号彼此干扰的问题。例如,当接触传感阵列中的一个传感单元时,周围的传感单元因为信号干扰的原因也会输出信号,这直接影响了信号处理电路和信号采集系统对传感单元真实位置的判断,会出现信息反馈误判、错判等结果。因此,很有必要对传感单元结构和阵列排布方式进行研究,找出阵列化排布出现的干扰信号的产生原因和抑制方法。

在本章中,我们详细阐述了基于接触起电效应的单电极式柔性传感器件单元的工作原理,并基于该工作原理,设计了多种传感单元的结构和阵列化排布方式,从抗干扰性、制作工艺及空间利用效率等几个方面考察传感单元的结构设计和传感阵列的排布方式。通过对传感单元的几种结构和排布方式进行比较,相对于方块形、工字形的传感器件单元结构,相互嵌套式的传感器件单元结构实现了每个传感单元都能作为一

个有效阵列传感节点,在阵列器件平面空间的利用率方面有非常显著的优势。此外本章还分析了信号干扰产生的可能原因并采取了措施。引入的屏蔽条和屏蔽层的能够显著的抑制在器件阵列化排布时出现的干扰信号,并且屏蔽层对干扰信号的抑制效果也要显著的优于屏蔽条。通过对不同的器件单元结构和排布方式综合比较,本论文选择带有屏蔽层的相互嵌套式的单电极式柔性传感器件单元和阵列作为柔性传感器件和阵列的设计方案。

3.2 传感器件单元和阵列的工作原理

传感器件单元是组成传感器件阵列的基本结构单元,基本结构是单电极式柔性传感器件。传感阵列中的节点由一个或多个传感器件单元组成,每一个节点对应于阵列中唯一的坐标。当物体接触节点中的传感器件单元时,由于接触起电效应,传感器件单元将产生电信号并通过信号通道向外传递,节点将同时向两个甚至更多的方向发出信号,信号处理电路或信号采集系统接收信号并对信号进行处理后,根据笛卡尔坐标系中的坐标定位原理可以确定发出信号的传感单元在阵列中的位置,从而实现对接触物体位置等信息的识别。

3.3 传感器件单元和阵列的结构研究

在相同数目的传感器件单元组成传感器件阵列的情况下,不同的传感器件单元结构直接决定着有效的传感节点数目。我们通过设计和研究不同的传感器件单元结构并阵列化排布,从制作工艺、抗干扰性及有限空间的利用效率等几个方面考察对比这些方案,并选择最佳的传感器件单元结构和阵列化排布方式。

3.3.1 方块形单元结构和阵列研究

3.3.1.1 方块形单元结构设计

典型的方块形单元结构如图3-1所示,每个单元是一个独立的单电极式传感器件,单元的结构和单电极式传感器件结构相同,包含聚合物材料层,背电极层和基底层。聚合物材料层通常选用摩擦电极序列上处于靠后位置的PTFE,氟化乙烯丙烯共聚物(FEP)等材料,用于和接触物体接触产生摩擦电荷。背电极材料通常选用银(Ag),铜(Cu)等金属,作为电极将产生的感应信号通过连接电极的信号通道传输给信号处理电路或者信号采集设备。聚酰亚胺(PI)具有非常优异的绝缘性能和力学性能,作为一种

工程材料,已广泛应用在航空、航天、微电子等领域,这里选择PI作为基底层材料。

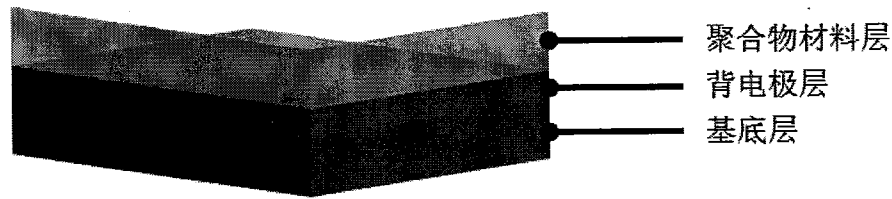


图 3-1 方块形单元结构

Figure 3-1 Illustration of the solid square structure of the sensing unit

3.3.1.2 方块形单元传感阵列

方块形单元结构是最简单的传感单元结构,将方块形单元结构阵列化排布即可得到传感阵列。用丙酮,异丙醇,酒精,去离子水依次冲洗 $13 \times 13 \text{ cm}^2$ 的PI薄膜,并在鼓风干燥箱中烘干。用激光雕刻机在普通复印纸上切割出两块 5×11 单元尺寸为 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的掩模版,橘色部分为镂空部分,分别标记为1和2,如图3-2(a)和(b)所示,作为磁控溅射蒸镀行列电极的掩模版。用磁控溅射以1作为掩模版在PI薄膜正面蒸镀Cu电极,再以2为掩模版在PI薄膜背面蒸镀Cu电极,掩模版1和掩模版2以方框为标记对准,制作好的传感阵列如图3-2(c)所示,形成了方块形单元传感阵列为基本单元的 11×11 传感阵列。在传感阵列信号通道引线的设计上,我们避免了每个传感单元引出一根信号通道引线的方式,设计了每行每列共用一条信号通道引线的方式,制作的 11×11 传感阵列的信号通道引线数量从121根降到22根,这种方式大大的减少了传感阵列的信号通道引线数量,降低了信号处理的复杂程度和难度。

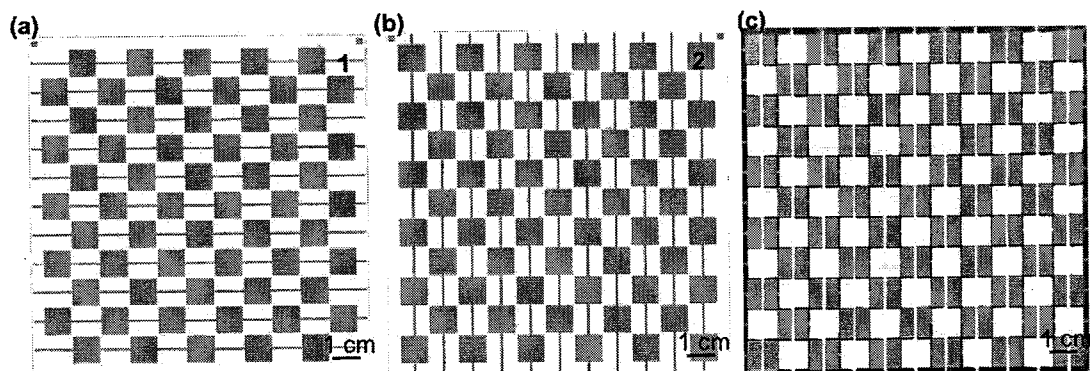


图 3-2 方块形单元传感阵列

Figure 3-2 Illustration of the solid square based sensing array

方块形单元传感阵列工作的基本原理是根据阵列节点输出信号通道引线的行线和列线来确定节点位于阵列中的位置，而阵列节点由相邻的四个方块形单元传感单元组成，示意图如图 3-3 所示，图中红色虚线方框表示传感阵列节点。当物体同时接触方框内任意一块行电极和任意一块列电极，通过对传感阵列的信号进行处理后均可推断出是物体接触了红色虚线位置处的阵列节点。把阵列节点等效为蓝色圆点，可以得出 11×11 传感阵列实际上等效于 10×10 的传感阵列节点。

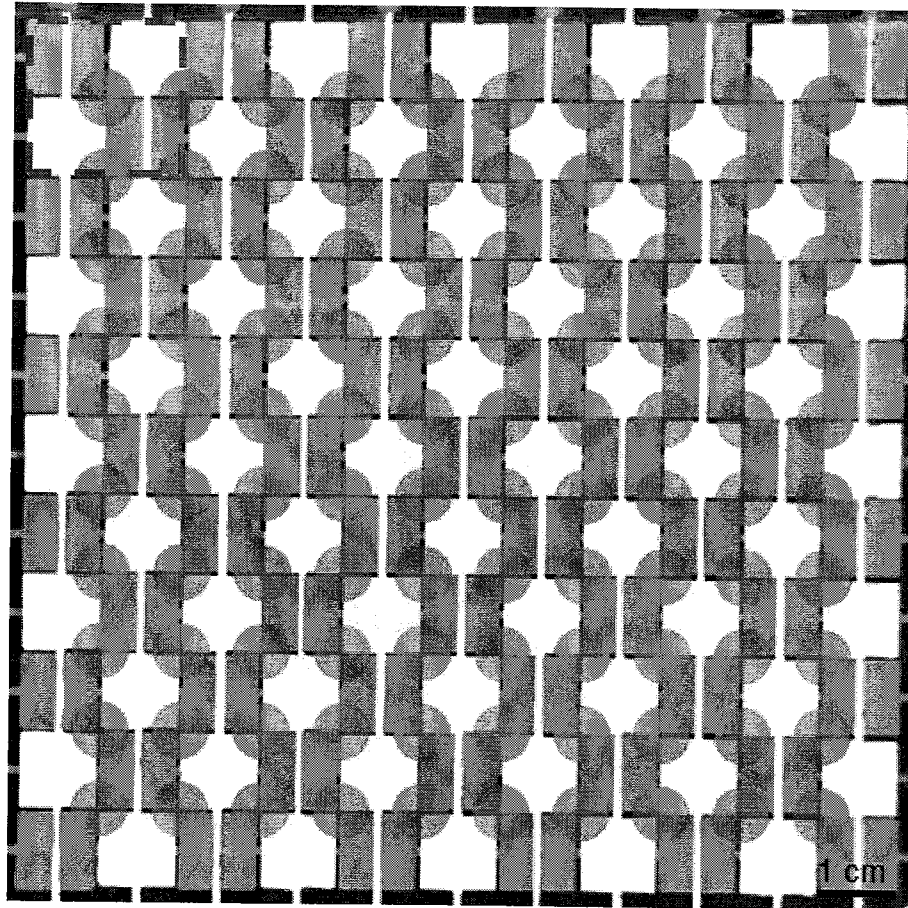


图 3-3 方块形传感阵列中的有效传感节点

Figure 3-3 the effective sensing nodes in the solid square based sensing array

方块形单元传感阵列设计了每行每列传感单元电极共用一条信号通道引线的方式。相对于每个传感单元引出一条信号通道引线方式的传感阵列，方块形单元传感阵列尽管牺牲了部分有效阵列节点，但信号通道引线的数量远低于每个传感单元引出一条信号通道引线方式的传感阵列的信号通道数目，以 m 行 n 列阵列为例，信号通道数目从 $m \times n$ 条减少为 $m+n$ 条，显著的降低了传感阵列信号的难度和复杂度。但是这种方式也带来了新的问题，当方块形单元阵列化排布后，传感单元之间存在比较大的

信号干扰。当物体接触单个传感单元电极时，如 3-4 所示，接触的传感单元所在的信号通道标记为 0，并测量了该传感单元信号输出幅值。此外，我们还测量了传感单元临近点的干扰信号输出幅值。在标记为 0 的传感单元周围，分别有三个行电极信号输出通道和两个列电极信号输出通道，三个行电极信号输出通道分别标记为 1，2，3，两个电极信号输出通道分别标记为 4，5。

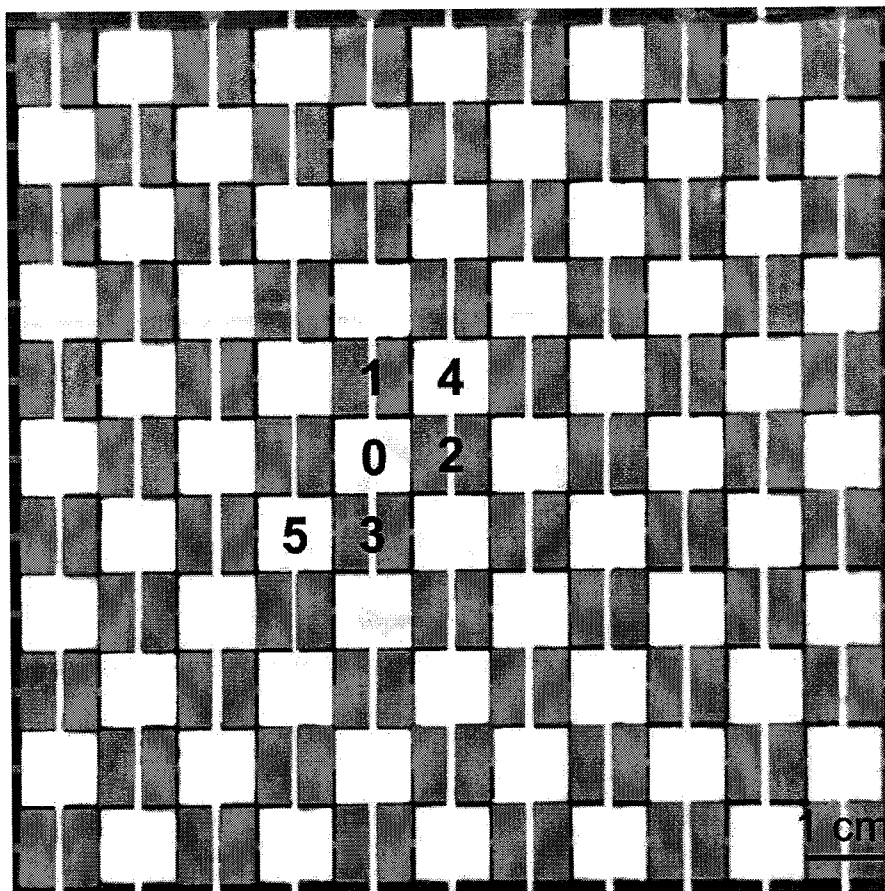


图 3-4 方块形传感阵列的单点测试示意图

Figure 3-4 Illustration of single point test of the solid square based sensing array

理想的情况下，周围的传感单元因为没有物体接触因而不会产生信号。而实际上，当物体接触单个传感单元时，在传感单元所在的信号传输通道测量到真实的输出信号幅值约在 1.5 V，周围最邻近未触碰的传感单元所在的信号传输通道测量到的干扰信号幅值约在 1 V，如图 3-5 所示。这种情况是由于传感单元之间相互的静电干扰造成的，当标记为 0 的传感单元接触-分离时，传感器件的摩擦层和接触物体之间会产生并保持有摩擦电荷，根据单电极式传感器件的工作原理，该传感单元摩擦层的背电极将会对外输出电信号。然而，对于接触物体而言，整个传感阵列都处于该接触物体带

有电荷的电场中。当接触物体在与标记为 0 的传感单元接触-分离时, 接触物体与传感阵列之间的距离发生从远到近再到远的过程, 传感阵列中的每个传感单元的电势也在发生周期性的变化, 因而也会产生周期性的电信号并对外输出。此外, 在信号通道向外传输信号的时候, 由于接触物体与传感单元之间的接触-分离在背电极上产生的是周期性的电信号, 这种周期性的电信号在空间会以电磁信号的形式向周围再扩散, 周围的电极接收到扩散的电磁信号也会再产生周期性的干扰电信号, 干扰信号就像水波一样向外扩散, 从而导致虽然阵列中只有一个单元被触碰, 但是几乎所有的信号通道都会向外输出信号的现象, 这也是干扰信号产生的最主要的两个原因。产生的干扰信号幅值与真实信号幅值相当, 这给传感阵列信号出来带来很大的困难, 非常容易造成信号处理电路或信号采集系统的误判、错判, 导致无法正确准确识别传感节点的位置, 使得传感阵列失去了应有的功能, 从而无法识别接触物体的真实位置。

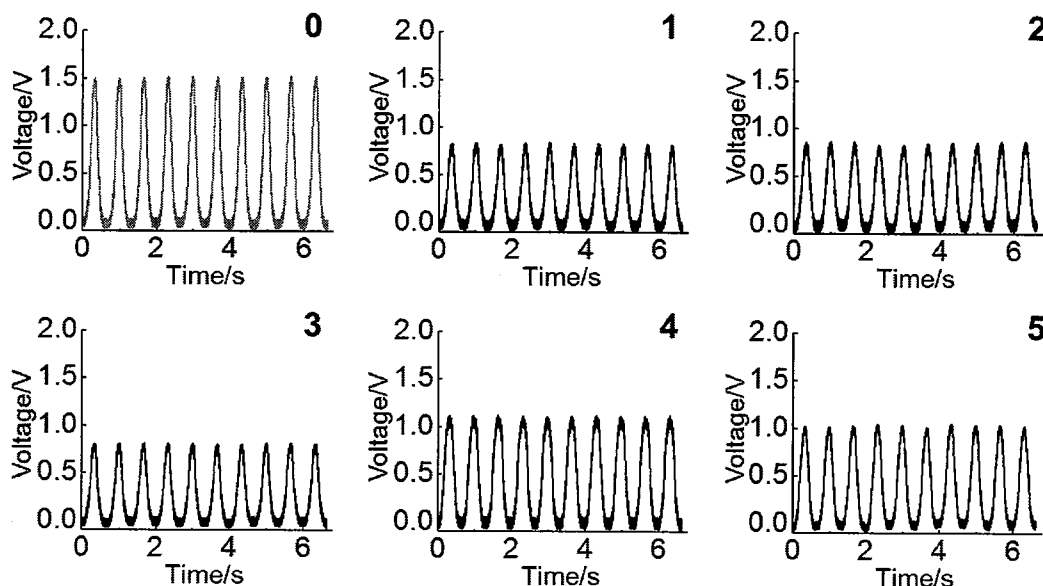


图 3-5 方块形传感阵列的单点测试结果

Figure 3-5 Results of the single point test in the solid square based sensing array

3.3.1.3 带屏蔽设计的方块形单元传感阵列

为了抑制方块形单元传感阵列出现的干扰信号, 解决方块形单元传感阵列面临的传感单元之间信号相互干扰的问题, 在方块形单元传感阵列的基础上, 我们引入了屏蔽电极, 设计了一种带屏蔽设计的方块形单元传感阵列, 引入屏蔽电极来削弱甚至消除因接触物体周期性运动带来的电势变化干扰和内部脉冲信号产生的电磁信号干扰。如图 3-6 所示, 方块形单元传感阵列之间引入条状的接地屏蔽电极, 正面每行的方块

形电极和背面每列的方块形电极被引入的接地屏蔽电极分隔开，一侧为信号传输通道的布线，另外一侧为条状接地电极布线，并且每一面的条状电极均全部为电性连接，并接地。正面和背面的条形接地屏蔽电极组成了一个方框，而阵列中的每个传感单元均被条形接地屏蔽电极包围住。设计的方框形屏蔽电极能够很好的屏蔽方框内的方形电极受到来自接触物体带有的摩擦电荷在空间产生的电场变化影响，以及因周期性脉冲信号在空间产生的电磁信号的影响，因此当物体接触传感阵列时，没有被接触的传感单元受到的干扰被显著抑制，输出的干扰信号幅值有效降低。

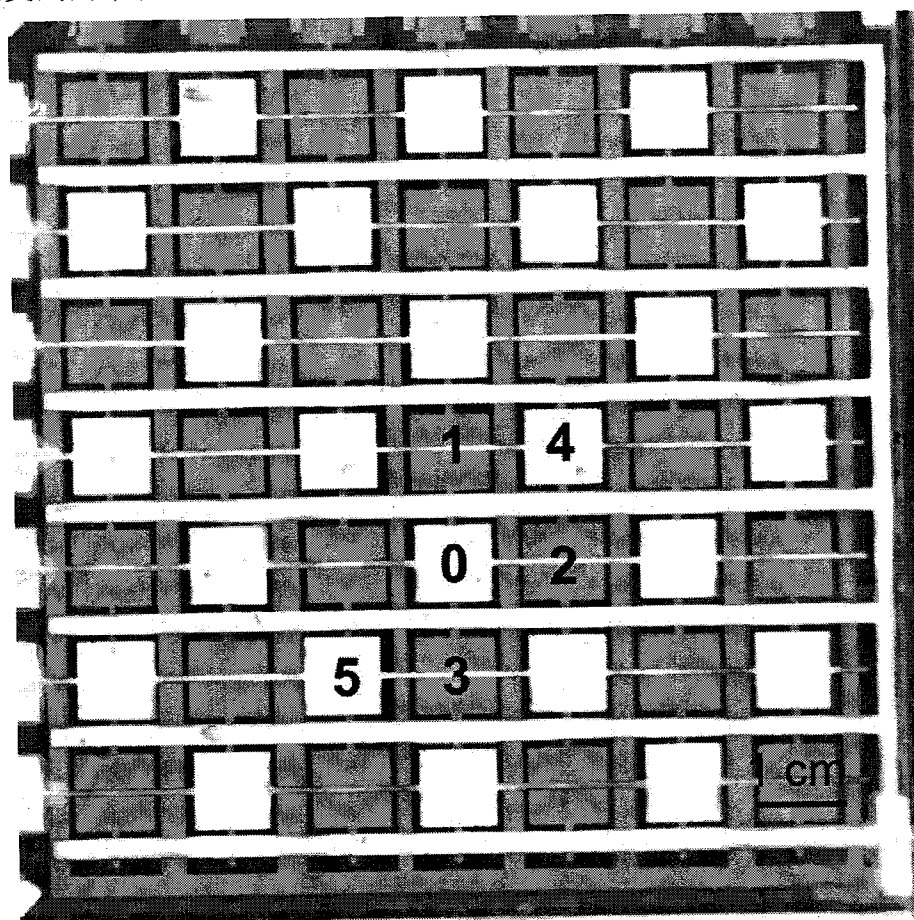


图 3-6 带屏蔽电极的方块形传感阵列的单点测试示意图

Figure 3-6 Illustration of the single point test in solid-square based sensing array with bar-shaped shielding electrode lines

这里仍然用 0 标记为物体接触的传感单元所在的信号传输通道，1，2，3，4，5 分别标记为被接触的传感单元最邻近的信号传输通道。实际测量时可以看到，如图 3-7 所示，在引入接地屏蔽电极的情况下，真实的信号输出幅值仍然约为 1.5 V，干扰信号的输出幅值显著降低，约为 0.1 V，相对没有条状屏蔽电极的干扰信号幅值，抑制

后的干扰信号输出降低了 10 倍，真实信号与干扰信号的比值达到了 15:1。条状屏蔽电极的作用非常明显，干扰信号被有效的抑制，并且真实信号能够很容易的与干扰信号区分开来，大大地降低了信号处理电路或信号采集系统处理分析信号的难度。尽管干扰信号仍然存在，但根据采集到的传感阵列输出信号，信号处理电路或信号采集系统能够比较容易的识别和定位真实信号是由哪些信号通道输出，利用二维平面内笛卡尔坐标定位原理，从而确定传感节点在传感阵列中的位置，进而确定接触物体的位置，最终实现传感阵列的功能。

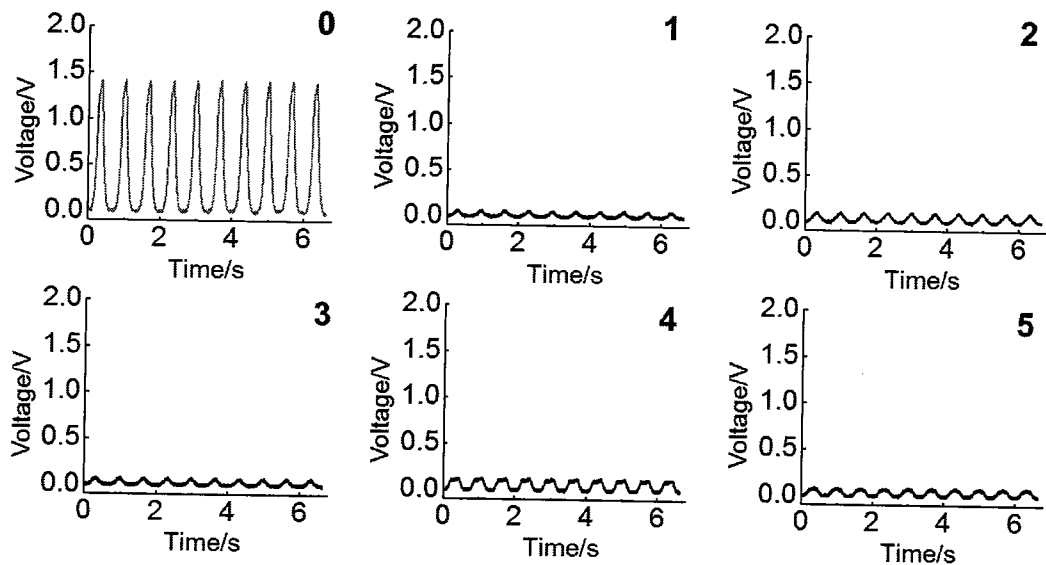


图 3-7 带屏蔽电极的方块形传感阵列的单点测试结果

Figure 3-7 Illustration of the single point test in solid-square based sensing array with bar-shaped shielding electrode lines

3.3.2 工字形单元结构这阵列研究

3.3.2.1 工字形单元结构设计

尽管引入的条状电极能够显著的抑制干扰信号，对于信号处理电路或信号采集系统而言，真实信号与干扰信号的比值需要再进一步的提高，以确保判断结果的准确率，尽可能的降低误判、错判的几率。对于方块形单元阵列而言，连接线横穿方块形电极。尽管条状的屏蔽电极抑制了大部分的脉冲信号带来的电磁信号的干扰，但是对于横穿方块形电极的连接线而言，方块形电极是非常好的接收器，接收了大部分由方块形电极发射的脉冲电磁信号。为了降低这种干扰，进一步减弱单元与单元、单元与引线之间的相互干扰，在方块形单元结构设计的基础了，我们做了结构单元的进一步优化，

设计了工字形单元结构,与方块形结构设计不同的是,工字形传感单元结构的中间部分做了挖空处理,剩下的两部分电极用连接线实现电性连接。中间挖空的部分用于通过相邻的传感单元连接线。这样设计的目的是降低连接线在横穿方块形电极时方块形电极接收干扰信号的强度,进而降低传感单元阵列化排布时带来的传感单元之间的互相干扰。

典型的工字形单元结构如图3-8所示,由聚合物材料层,背电极层和基底层组成。聚合物材料层通常选用摩擦电极序列上处于靠后位置的 PTFE, FEP 等材料,用于和接触物体接触产生摩擦电荷。背电极材料通常选用 Ag, Cu 等金属,作为电极将产生的感应信号通过连接电极的信号通道传输给信号处理电路或者信号采集设备,通常选用 PI 作为基底层材料。与方块形单元传感阵列不同的是,工字形传感单元的背电极做了一定的结构设计,将原本方正的背电极图案化处理为工字形,变成了两块分立的电极,这两块分立的电极通过连接线实现电性连接。而中间的空白地方用于通过另外一层相应位置电极信号传输通道。这种设计改变了原本方块形电极覆盖横穿信号传输通道的方式,变成了传感单元分立电极之间的连接线与信号传输通道交叉,大大的减少了背电极与信号传输通道的接触面积,减少了因信号传输通道周期性脉冲发射的电磁信号对覆盖在信号传输通道上传感单元背电极的影响,从而进一步的抑制干扰信号。

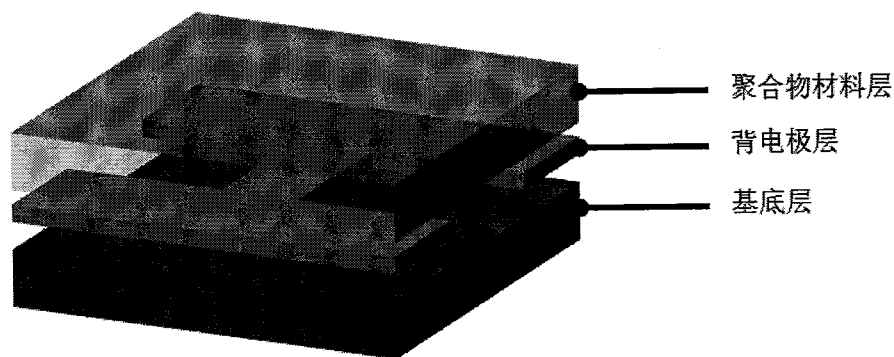


图 3-8 工字形单元结构

Figure 3-8 Illustration of the I-shaped sensing unit

3.3.2.2 工字形单元传感阵列

在工字形传感单元的基础上,将工字形单元结构阵列化排布即可得到传感阵列。用丙酮,异丙醇,酒精,去离子水依次冲洗 $13 \times 13 \text{ cm}^2$ 的 PI 薄膜,并在鼓风干燥箱中烘干。用激光雕刻机在普通复印纸上切割出 4 块 4×7 单元尺寸为 $1 \times 1 \text{ cm}^2$ 的掩模版,

分别为行背电极掩模版，行屏蔽电极掩模版，列背电极掩模版和列屏蔽电极掩模版。用磁控溅射以行背电极掩模版和行屏蔽电极掩模版在 PI 薄膜正面蒸镀 Cu 电极，再以列背电极掩模版和列屏蔽电极掩模版在 PI 薄膜背面蒸镀 Cu 电极，行背电极掩模版，行屏蔽电极掩模版，列背电极掩模版和列屏蔽电极掩模版以方框为标记对准，制作好的传感阵列如图 3-9 所示，形成了工字形单元传感阵列为基本单元

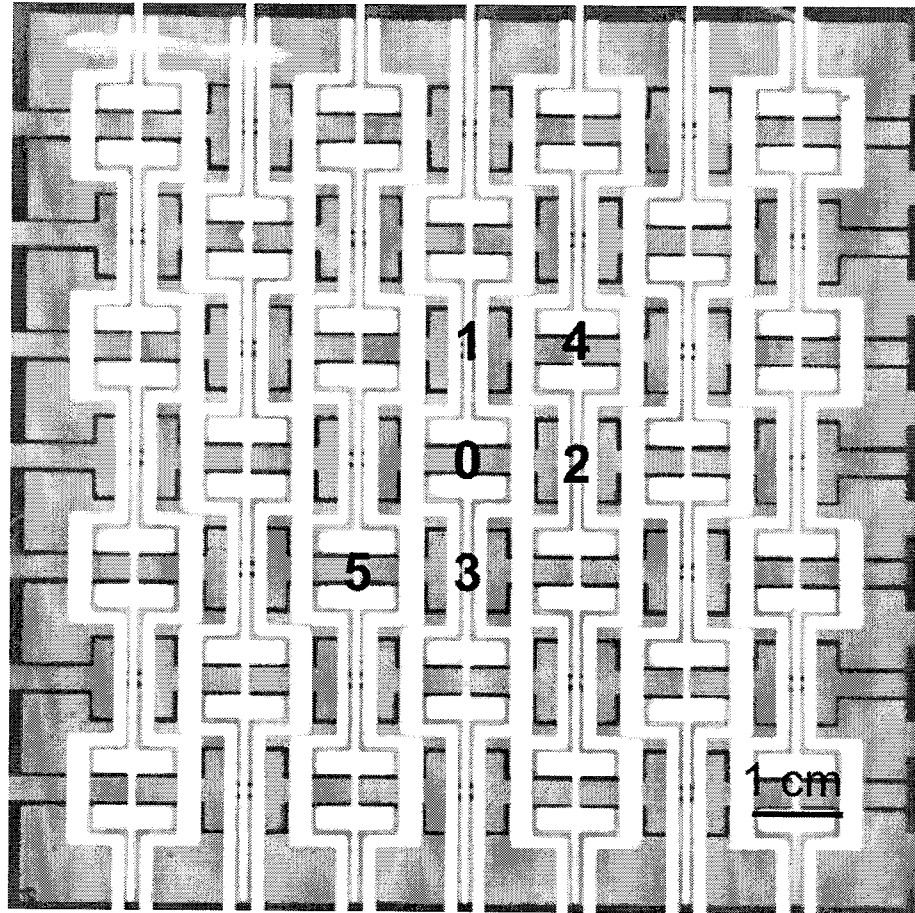


图 3-9 带屏蔽电极的工字形传感阵列单点测试示意图

Figure 3-9 Illustration of single point test of the I-shaped based sensing array with bar-shaped shielding electrode lines

的 7×7 传感阵列，行屏蔽电极和列屏蔽电极相互交叉形成了一个框，每一个工字形传感单元均对应于唯一的屏蔽电极组成的框，每行每列的信号传输通道在连接相邻的工字形传感单元时同样也贯穿了屏蔽电极形成的屏蔽框。为了进一步的抑制干扰信号的强度，非物体接触侧的屏蔽电极设计做了进一步的优化，在不影响行电极正常工作的情况下，行电极之间及传感单元区域之外的空白区域均覆盖了屏蔽电极，这样做的目的是尽可能的降低传感单元内部产生的脉冲电磁信号干扰、因接触物体运动

产生的电势变化带来的干扰以及环境中的电磁干扰等对器件的影响。在传感阵列信号通道引线的设计上,工字形单元传感阵列沿用了方块形单元传感阵列的布线设计,每行每列共用一条信号通道引线的方式,制作的 7×7 传感阵列的信号通道引线数量仅为 14 根,大大降低了信号处理电路或信号采集系统处理信号的难度。

为了考察传感单元之间信号干扰的情况,在接触物体与传感阵列接触-分离的过程中,我们测量了接触位置所在的信号传输通道及接触位置最近邻的三条行信号传输通道、两条列信号传输通道输出的信号幅值。如图 3-9 所示,为了便于描述,接触位置所在的信号传输通道、接触位置最近邻的三条行信号传输通道以及两条列信号传输通道分别标记为 0, 1, 2, 3, 4, 5。测试结果如图 3-10 所示,当物体接触标记为 0

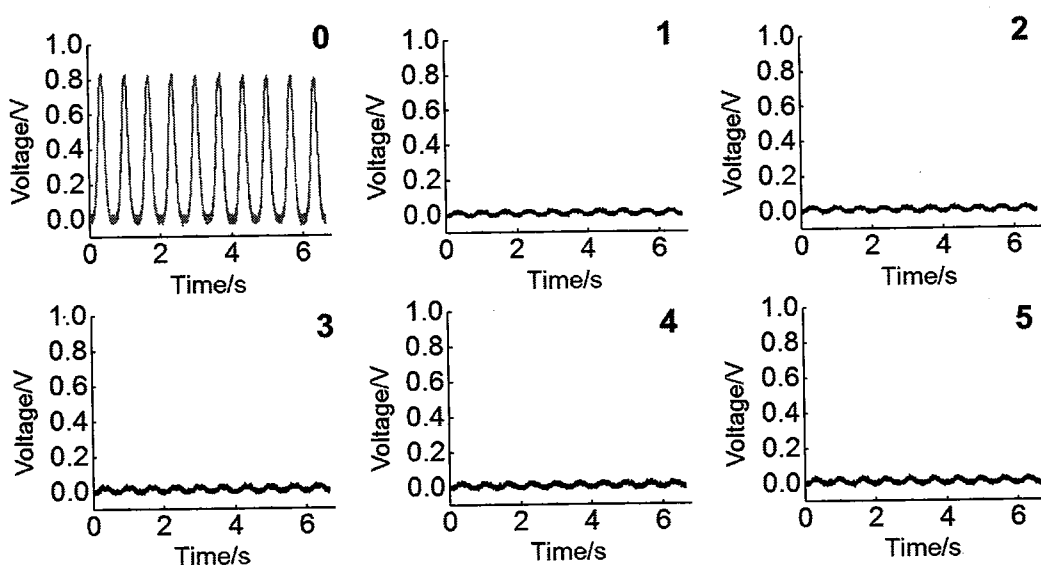


图 3-10 带屏蔽电极的工字形传感阵列单点测试结果

Figure 3-10 Results of single point test of the I-shaped based sensing array with bar-shaped shielding electrode lines

的工字形传感单元时,在传感单元所在的信号通道测量得到的真实信号输出幅值约为 0.8 V, 接触位置最近邻的三条行信号传输通道以及两条列信号传输通道输出的干扰信号幅值约为 0.03 V, 真实信号幅值与干扰信号幅值的比值达到了约 27:1.相对引入条形屏蔽电极的方块形传感阵列而言,工字形设计的传感阵列将真实信号幅值与干扰信号幅值的比值从 15:1 提高到了 27:1, 工字形结构设计的传感单元通过将背电极中间隔开留出专门的信号传输通道位置,减少背电极与信号传输通道接触面积,进一步的抑制了干扰信号,同时也证实了信号传输通道传输的周期性脉冲电磁信号对位于信号传输通道上的背电极的影响。然而这种设计也存在一定的问题,比如图案化电极设

计后, 物体与传感阵列接触-分离产生的有效信号幅值降低至约 0.8 V, 产生这种现象的原因是接触起电效应是面效应, 当物体与传感单元接触时, 有效的接触面积越大, 相对应的信号输出幅值越高。这里对背电极进行了图案化设计, 从方块形变成了工字形, 相当于减少了物体与传感单元的有效接触, 因而信号输出幅值从 1.5 V 降至 0.8 V。虽然测量到的信号幅值降低了, 但是真实信号与干扰信号的比值提高了, 信号的质量提高了。小信号可以通过信号处理电路放大后再进一步处理, 而较高的真实信号与干扰信号的比值将大大降低信号处理电路对小信号的处理难度, 无需复杂的放大滤波设计。工字形单元传感阵列有效的抑制了干扰信号, 对于传感阵列无论是大面积应用场景还是高分辨率要求均有非常重要且深远的意义。

引入屏蔽设计的工字形传感单元阵列有效的抑制了传感单元内部产生的脉冲电磁信号干扰、因接触物体运动产生的电势变化带来的干扰等对器件的影响, 相对方块形单元阵列和引入条形屏蔽电极的方块形单元阵列, 工字形单元传感阵列能够非常有效的抑制干扰信号的输出。当物体接触传感阵列时, 工字形单元传感阵列真实信号输出幅值与干扰信号输出幅值达到了 27:1, 高于引入条形屏蔽电极的方块形单元阵列的 15:1, 远高于未做任何屏蔽处理的方块形单元阵列的 1.5:1。虽然工字形单元设计造成了物体与传感单元接触时输出信号幅值的降低, 这个问题可以通过信号采集电路先做信号放大等处理来解决, 并且相对于有较大信号输出, 但信号输出幅值与干扰信号幅值相当的低质量的真实信号, 信号输出幅值远高于干扰信号幅值的高质量小信号更加容易被信号处理电路和信号采集电路处理。因此工字形单元阵列的结构设计和阵列排布要优于带条形屏蔽电极设计的方块形单元阵列, 更远优于不带任何屏蔽设计的方块形单元阵列。

3.3.3 相互嵌套式单元结构和阵列研究

尽管工字形单元阵列非常有效的抑制了干扰信号, 在物体接触传感阵列单元时, 信号处理电路或信号采集系统能够很容易的将传感阵列输出的真实信号与诸多干扰信号区分开。但是, 无论是方块形单元阵列, 带条形屏蔽电极的方块形阵列, 还是带屏蔽电极的工字形单元阵列, 始终存在着有效的传感节点要少于实际的传感单元数目的问题。这些传感单元阵列对于二维平面空间的利用率较低, 都是由四个传感单元组成一个有效的传感节点。当物体与传感阵列接触时, 物体最少要同时接触到四个传感单元中相邻的两个, 才能根据接收到的输出信号确定接触物体位于传感阵列中的节点

位置。对于一个有效的传感节点而言,实际应用中的尺寸大小是单个传感单元的四倍大小,实际使用的分辨率要大大低于设计的分辨率。此外,在大面积应用场景下,制作工艺难度虽然不高,但是对于高分辨率应用场景下,四个传感单元构筑一个有效的传感节点不仅造成了平面空间的浪费,同时也这给制作工艺提出了较高的要求,给器件制作带来了较大的挑战。

3.3.3.1 相互嵌套式单元结构设计

针对方块形单元阵列、带条形屏蔽电极方块形单元阵列以及工字形单元阵列在制作工艺、空间利用率遇到的问题,我们设计了一种全新的相互嵌套式单元结构和阵列。这种相互嵌套式的单元结构实现了每个传感单元均作为一个有效节点,设计的分辨率即为实际使用的分辨率,有效的解决了方块形单元阵列、带条形屏蔽电极方块形单元阵列以及工字形单元阵列遇到的空间利用率问题。同时在制作工艺方面采用了层叠式的制作方法,通过一层一层的层叠方式即可制作传感阵列,制作工艺相对方块形单元阵列、带条形屏蔽电极方块形单元阵列以及工字形单元阵列而言要简单。此外,相互嵌套式的结构设计引入了层状屏蔽电极,将一个传感单元内集成的两个背电极通过层状屏蔽电极物理隔离,干扰信号得到了进一步的抑制。

典型的相互嵌套式的结构如图 3-11 所示,最上面一层是聚合物材料层,作为与物体接触的摩擦层和起电层材料。聚合物材料层通常选用摩擦电极序列上处于靠后位置的 PTFE, FEP 等材料,用于和接触物体接触产生摩擦电荷。集成的两个背电极层位于聚合物材料层正下方,并且位于不同的层上,分别为列电极和行电极。这里将中间带孔的方形电极标记为列电极,实心方形电极标记为行电极。列电极和行电极的正中心相互重合,行电极位于列电极的正下方,并且行电极的尺寸小于列电极的孔的尺寸。为了更好的抑制干扰信号,这里引入了层状的屏蔽电极,位于行电极和列电极之间,层状屏蔽电极中间为孔形结构,孔的尺寸大于行电极的尺寸且小于列电极的孔的尺寸。行电极,层状带孔屏蔽电极以及列电极构成了相互嵌套式的单元结构。层状带孔屏蔽电极将行电极和列电极隔离开,有效的抑制了单元内两个背电极的相互干扰。同时,传感单元之间行电极的连接线和列电极的连接线位于不同的层中,彼此之间被层状带孔屏蔽电极隔离,因此产生的脉冲信号发出的电磁信号均被层状电极吸收阻断,不会再影响到位于信号传输通道上的背电极,消除了内部脉冲信号产生的电磁信号干扰。带孔屏蔽电极与列电极、行电极直接用绝缘层隔开,保证带孔屏蔽电极与列电极、

行电极之间是相互电性绝缘，避免彼此之间导通。整个传感单元层叠在基底层上，最终组成了相互嵌套式结构的传感单元。

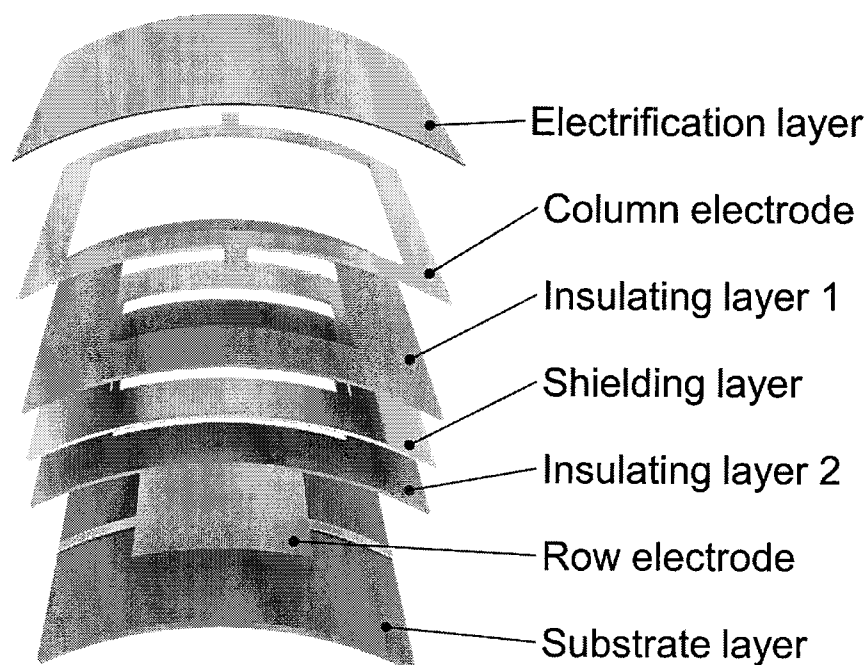


图 3-11 相互嵌套式传感单元结构

Figure 3-11 Illustration of the integrated sensing unit

3.3.3.2 相互嵌套式传感单元阵列

相互嵌套式传感单元阵列化排布即得到相互嵌套式传感单元阵列。传感阵列最上层选用 PTFE 作为摩擦层和起电层材料，用于和物体在接触-分离时产生摩擦电荷。为了简化传感阵列器件的制作工艺和流程，这里用导电布作为背电极材料，用激光雕刻的方法作为主要的制作工艺。先用激光雕刻机将设计好的行电极阵列层、带孔屏蔽层电极层以及列电极阵列层的图案雕刻在导电布上并做好标记，然后将行电极阵列层、带孔屏蔽层和列电极阵列层以图 3-11 的顺序依次层叠，行电极阵列层、带孔屏蔽层和列电极阵列层之间的绝缘层之间的绝缘层用打印纸作为绝缘材料，在激光雕刻导电布之前先贴至导电布的一面，随导电布一起用激光雕刻机切割。用打印纸作为基底层材料，制作好的 16×16 相互嵌套式单元传感阵列如图 3-12 所示。

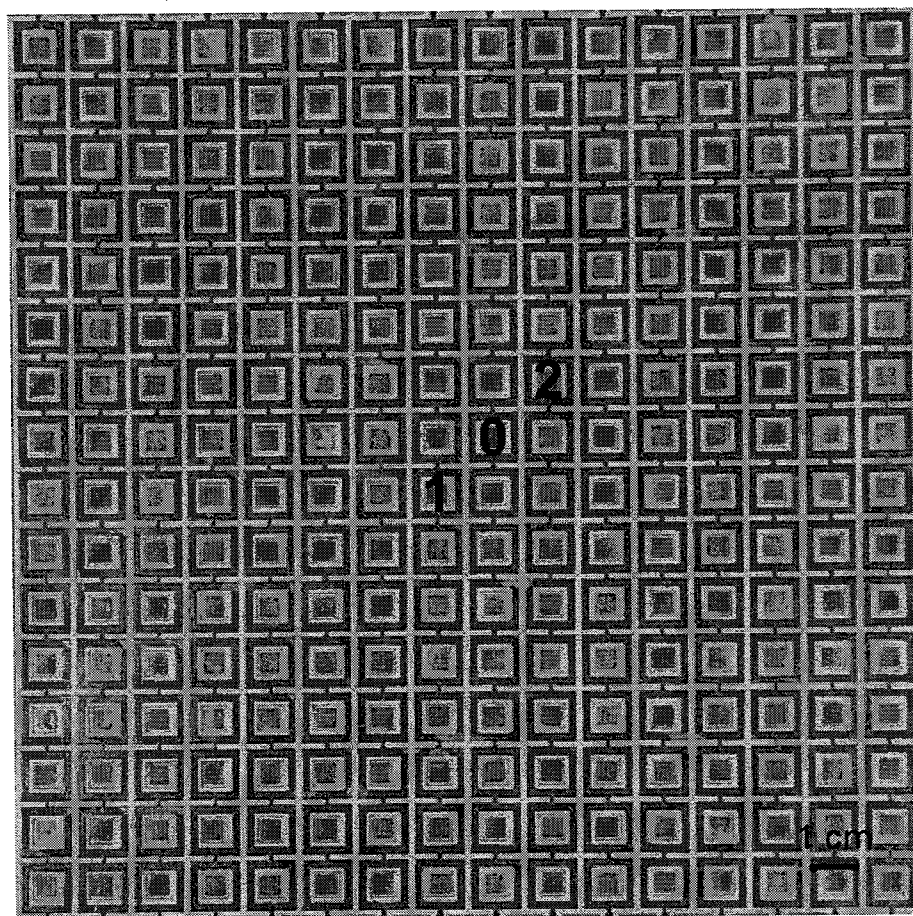


图 3-12 带屏蔽电极层的相互嵌套式传感阵列单点测试示意图

Figure 3-12 Illustration of single point test of the integrated sensing array with shielding electrode layer

相互嵌套式传感单元集成了行电极和列电极，当传感单元组成传感阵列时，信号通道的连线设计和方块形单元阵列一样，每一行每一列的相互嵌套式传感单元电极共用一条信号通道。工作的基本原理是根据阵列单元输出信号通引线的行线号和列线号来确定被接触的传感单元在阵列中的位置，即当物体以接触-分离的方式触碰传感单元时，传感单元将通过行电极和列电极同时向外输出信号，根据信号输出的行号和列号确认传感单元在传感单元阵列中的位置，进而确定接触物体的位置。相互嵌套式传感单元阵列实现了每一个传感单元即是传感阵列中的一个有效节点，实际传感节点数目等于制作的传感单元数目，相对方块形单元阵列，带条形屏蔽电极的方块形阵列，还是带屏蔽电极的工字形单元阵列，相互嵌套式传感单元阵列有效的利用了平面空间。

为了考察相互嵌套式传感单元阵列内单元之间信号干扰的情况，在接触物体与传感阵列接触-分离的过程中，我们测量了接触位置所在的传感单元输出信号幅值以及

最近邻传感单元的输出信号幅值。这里，以 0 标记为接触位置，1 和 2 分别为最近邻的两个点，接触位置的行信号通道标记为 0-1，列信号通道标记为 0-2，最近邻两个点的行信号通道分别标记为 1-1 和 2-1，列信号通道分别标记为 2-2，测试结果如图 3-13 所示。当物体接触标记为 0 的传感单元时，传感单元的行信号通道和列信号通道输出

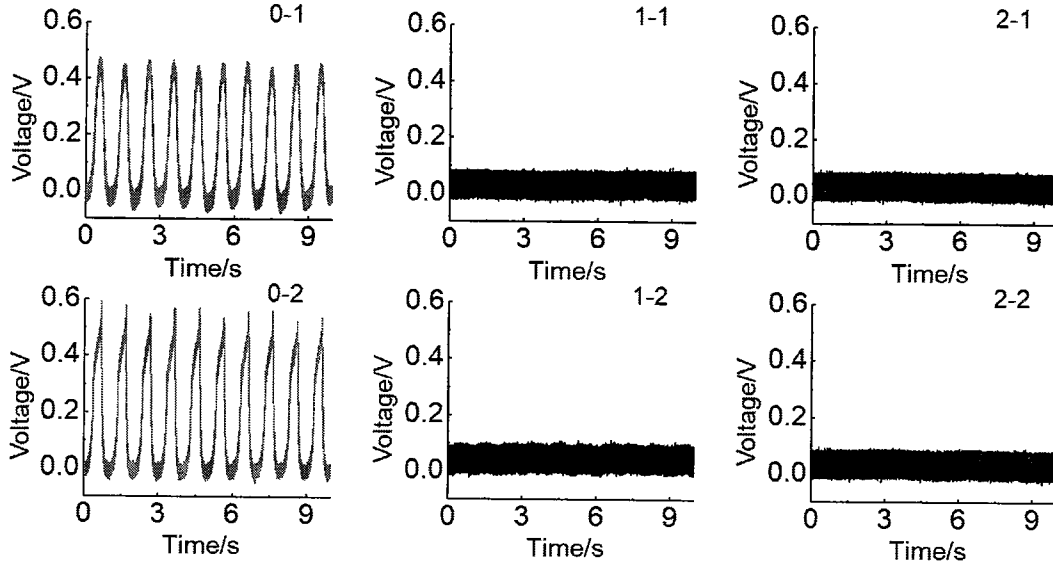


图 3-13 带屏蔽电极层的相互嵌套式传感阵列单点测试结果

Figure 3-13 Illustration of single point test of the integrated sensing array with shielding electrode layer

约为 0.5 V，此时，标记为 1 和 2 的传感单元行列信号输出非常微弱，几乎观察不到，超过背底噪声基线的最大幅值约为 0.02 V，真实信号幅值与干扰信号幅值的比值最少为 25:1。相互嵌套式设计传感单元接触点行列输出信号幅值相对方块形设计传感单元和工字形设计传感单元，产生的原因是相互嵌套式单元设计在一个传感单元内集成了行列两个电极，有效接触面积相对方块形单元设计和工字形设计较低。但是，相互嵌套式单元设计在干扰信号抑制方面远优于方块形单元设计和工字形单元设计，引入层状屏蔽层有效的抑制了接触物体周期性运动带来的电势变化干扰、内部脉冲信号产生的电磁信号干扰及周围环境中的电磁影响，在物体接触传感单元时，周围的传感单元几乎没有干扰信号输出，降低了信号处理电路或信号采集系统处理信号的难度，对大面积应用和高分辨设计非常有意义。

3.4 本章小结

本章设计和研究了三种基于接触起电效应的单电极式柔性传感单元结构,详细阐述了每种结构传感器件的工作原理和设计思路。在此基础上对传感单元阵列排布进行了设计,对传感单元阵列排布时出现的信号干扰问题进行了分析并采取了措施,引入了条形和层状屏蔽电极,针对三种单电极式柔性传感单元设计了四种传感单元阵列排布方式,从抗干扰性、信号质量、制作工艺及空间利用效率等几个方面考察传感单元的结构设计和传感阵列的排布方式。得出的结论有:

(1)方块形单元结构设计简单,在方块形单元阵列化排布时,我们设计了行列共用一条信号传输通道的排布方式,相对阵列中每个传感单元引出一条信号通道,行列共用一条信号传输通道的排布方式大大减少了传感阵列的信号通道引线数量,降低了信号处理的复杂程度和难度。针对方块形单元阵列化排布时遇到的信号干扰问题,我们通过在阵列中引入条形屏蔽电极的方式来抑制接触物体周期性运动带来的电势变化干扰、内部脉冲信号产生的电磁信号干扰及周围环境中的电磁影响,真实信号幅值与干扰信号幅值从约 1:1 提高至 15:1,降低了信号处理电路或信号采集系统分析处理传感阵列输出信号的难度。

(2)工字形单元结构设计是为了对干扰信号进行进一步的抑制,提高信号质量,即真实信号幅值与干扰信号幅值之比,通过对方块形电极图案化设计的方式,将方块形电极中间挖空变成工字形,中间挖空的部分用于通过相邻的传感单元连接线,工字形单元结构设计进一步的抑制了干扰信号,真实信号输出幅值与干扰信号输出幅值之比达到了 27:1,真实信号能够很轻易的与干扰信号区分开。

(3)相互嵌套式单元通过将行列电极集成到一个传感单元的方式,实现了每个传感单元即是一个有效的传感阵列节点,相对方块形单元阵列和工字形单元阵列中四个传感单元构筑一个有效的传感节点,相互嵌套式单元阵列大大提高了空间利用率。此外,与相对方块形单元和工字形单元不同,相互嵌套式单元引入了层状屏蔽电极,相互嵌套式单元阵列的真实信号幅值与干扰信号幅值之比最小为 25:1,层状屏蔽电极对干扰信号的抑制要优于条形屏蔽电极。当物体接触传感阵列单元时,被接触的传感单元最邻近的单元几乎不受影响。此外,相互嵌套式单元阵列采用了层叠式的制作工艺,制作难度和阵列可扩展性要远优于方块形单元阵列和工字形单元阵列。

(4)通过对不同的器件单元结构和排布方式综合比较,本论文选择带有屏蔽层的

相互嵌套式的单电极式柔性传感器件单元和阵列作为柔性传感器件和阵列的设计方案。

第四章 柔性传感阵列的仿真模拟研究

4.1 前言

在基于接触起电效应的单电极式柔性传感器件工作原理和器件结构比较的基础上,本章利用有限元分析软件对相互嵌套式传感单元结构和传感阵列进行仿真模拟研究,找出影响相互嵌套式传感单元和阵列信号输出的关键因素。

将单个基于接触起电效应原理的柔性薄膜传感器件阵列化设计和排布,得到的柔性薄膜传感阵列采集到的信息量要远远比单个传感器件采集到的信息丰富。同样是单点接触,单个传感单元仅仅能获得是否有物体接触的信息,而传感阵列不仅能够感知是否有物体接触,同时也能够识别并得到物体在二维平面内的位置。对于移动的物体,柔性薄膜传感阵列还能够识别物体移动的轨迹,并能够识别反馈物体的实时位置。^[73]对于多点接触,柔性薄膜传感阵列能够准确识别物体按压的位置,并能够识别出接触物体的大致形状。然而,传感单元组成传感阵列会出现一系列新的问题,比如,组成阵列后,传感单元之间会出现信号干扰的问题。^[74]虽然通过引入屏蔽电极的方法能够从一定程度上抑制干扰信号,但是没有深入的分析 and 量化引入的屏蔽电极对干扰信号的抑制效果,对传感单元的结构和阵列设计没有很大的参考和指导意义。同时,对于相互嵌套式的传感单元而言,单个传感单元的面积和空间是有限的,需要分析研究集成在相互嵌套式传感单元内行列电极的最佳相对面积比,使得物体在与传感单元接触-分离时行列电极所在的信号通道都能输出可处理的传感信号,不至于出现行信号很高而列信号很低或者列信号很高而行信号很低的问题。对于传感单元结构和传感阵列的设计而言,需要量化引入的屏蔽层电极的屏蔽效果,找出影响传感单元结构和传感阵列输出的关键因素,才能确定传感单元结构和阵列的最佳方案。通过具体实验制作一个个传感单元结构和传感阵列来找出影响传感单元结构和传感阵列输出的关键因素,确定最佳传感单元结构和阵列最佳方案固然可行,但这种方法耗时长工作量大。有限元分析采用数学近似的方法模拟真实的物理系统。具有便捷、实用和有效的特点。通过在仿真软件内改变设定的参数来模拟一次次实验,有限元分析方法能够节省大量的时间。此外有限元分析可以任意改变参数,甚至实现对极限情况的模拟仿真,这是实际实验很难做到的。

在本章中，我们借助 COMSOL 有限元分析软件，研究了基于接触起电效应的相互嵌套式传感器件单元结构和传感阵列，考察了屏蔽层、传感单元相对尺寸等对柔性薄膜传感阵列的信号输出的影响。同时对 COMSOL 的仿真结果进行分析，并得到给定条件下的最优的解决方案。通过对计算结果综合比较，本论文定量的评价了屏蔽层的屏蔽效果，并选择行列电极面积比为 1 作为传感单元内行列电极的设计方案。

4.2 柔性传感阵列的器件结构

基于接触起电效应的 8×8 相互嵌套式柔性传感阵列结构如图 4-1 所示。相互嵌套

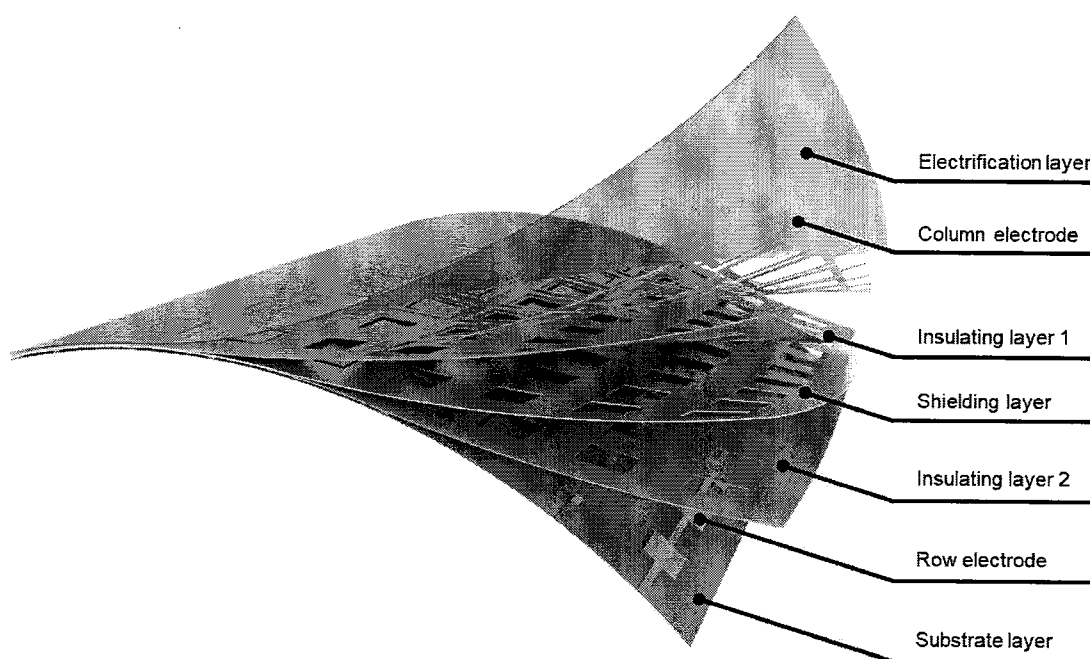


图 4-1 8×8 相互嵌套式柔性传感阵列结构

Figure 4-1 Illustration of the 8×8 integrated unit based flexible sensing array

式传感单元以阵列化排布后得到相互嵌套式传感阵列，相互嵌套式传感单元中的行电极相互串联共用一条信号传输通道，列电极相互串联共用一条信号传输通道， 8×8 相互嵌套式传感阵列一共有 8 条行电极信号传输通道和 8 条列电极信号传输通道。相互嵌套式传感阵列同样是层状结构，由聚合物材料层，三层电极层，两层绝缘层和基底层组成。聚合物材料层位于传感阵列器件的最顶层，作为摩擦层和起电层，用于与物体接触。三层电极层位于聚合物材料层正下方，带孔屏蔽电极层位于行电极层和列电极之间，用于抑制行列电极之间因脉冲信号带来的电磁信号干扰，降低因接触物体周期性运动带来的电势变对传感器件的影响。绝缘层位于行电极层与带孔屏蔽电极层及

列电极层与带孔屏蔽电极层之间,防止带孔屏蔽电极层,行电极层,列电极层之间出现短路。基底层位于传感阵列的最下层,起到支撑整个器件的作用。

4.3 影响信号输出的关键阵列结构因素

相互嵌套式柔性传感阵列信号输出来自于接触起电和静电感应耦合效应。物体与聚合物材料层接触-分离时会在物体和聚合物表面会产生电性相反的摩擦电荷,由于静电感应效应,在聚合物材料层表面的摩擦电荷和接触物体的摩擦电荷共同作用下,位于聚合物材料层下方的行电极和列电极中将产生感应电荷,产生的感应电荷数量会随接触物体与聚合物材料层的接触-分离发生周期性变化。而感应电荷数量的周期性变化将在行列电极中产生周期的脉冲电信号。在信号产生的过程中,接触物体与聚合物材料的有效接触面积将直接的影响传感阵列的信号输出。而对于阵列中的传感单元而言,物体与聚合物材料层的有效接触面积是固定的,对于相互嵌套式结构的传感单元而言,聚合物材料层下方的背电极层的面积直接影响着行列信号的输出,需要对相互嵌套式传感单元内的行列电极相对面积比进行研究,找出最佳的结构设计,使得在物体与传感阵列接触-分离的过程中行列信号通道输出信号差值不大并均容易被处理的信号。通过对传感单元结构的研究可以发现,在没有屏蔽电极的引入时,虽然在物体与传感单元接触时信号传输通道可以输出较高的信号幅值,但未接触区域输出的干扰信号幅值也很大,甚至与真实信号幅值相当,这给传感阵列的信号处理带来很大的挑战。因此,传感阵列中屏蔽电极对传感阵列的信号输出也有很大的影响。作为传感单元的结构性因素,聚合物材料厚度、电极厚度、绝缘层厚度等对阵列信号输出也有一定的影响,由于在柔性传感阵列中,这些材料本身就很薄,厚度改变的幅度很小,对阵列信号的影响相对屏蔽层电极、行列电极相对面积比而言可以忽略。故本节以 3×3 基于接触起电效应的相互嵌套式传感阵列为例,重点考察屏蔽层设计以及行列电极相对大小对传感阵列信号输出的影响。

4.3.1 传感阵列具体模拟仿真方法

基于接触起电效应的柔性传感器件的基本工作原理是基于接触物体与传感阵列之间接触起电和静电感应的耦合效应,我们利用 COMSOL 有限元分析软件中静电学模块来分析物体在与传感阵列接触-分离过程中每个传感单元部件的电势变化,并通过电势变化来分析屏蔽层电极和行列电极相对面积比对传感阵列的信号输出的影响。

以 3×3 基于接触起电效应的相互嵌套式传感阵列为例。基底层材料作为整个器件的衬底材料对阵列的信号输出影响微弱，为了减少软件的运算负荷，故在模拟仿真时略去。设定每个传感单元尺寸为 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ ，传感单元之间间隔为 5 mm 。接触物体尺寸为 $5 \times 5 \times 1 \text{ cm}^3$ ，长宽尺寸与传感单元一样，并且接触物体位于传感阵列的中心位置，这样放置便于分析物体与传感阵列接触-分离时，接触点最邻近位置干扰信号的强弱。当接触物体与摩擦层接触时，传感阵列连同物体的整体电势分布如图 4-2 所示。

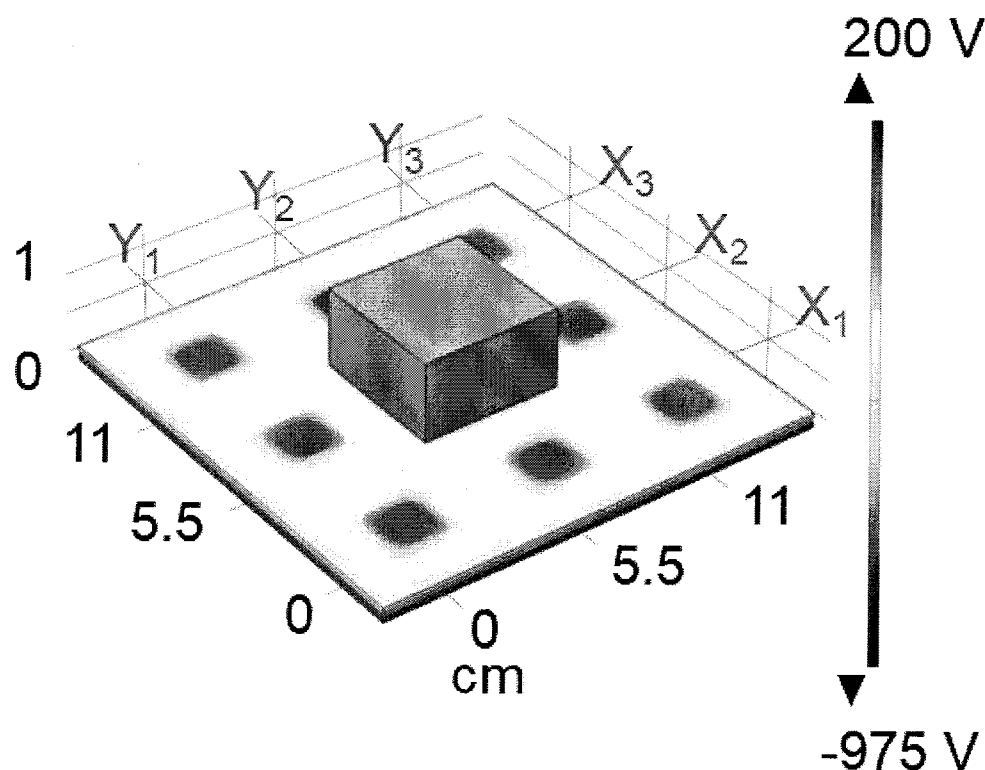


图 4-2 3×3 基于接触起电效应的相互嵌套式传感阵列

Figure 4-2 Illustration of the 3×3 integrated unit based flexible sensing array

为了更加清楚的展现基于接触起电效应的相互嵌套式结构单元的柔性传感器件中各个组成部分的电势分布，更加清楚的描述引入的带孔屏蔽电极对于相互嵌套式传感单元内行列电极之间的干扰信号的抑制效果以及对不同电极层之间的干扰信号的抑制效果，我们将基于接触起电效应的相互嵌套式结构单元的柔性传感器件的每一个组成部分的模拟仿真结果分别予以展示。

接触物体与传感阵列接触的表面显示出正电势，如图 4-3 所示，

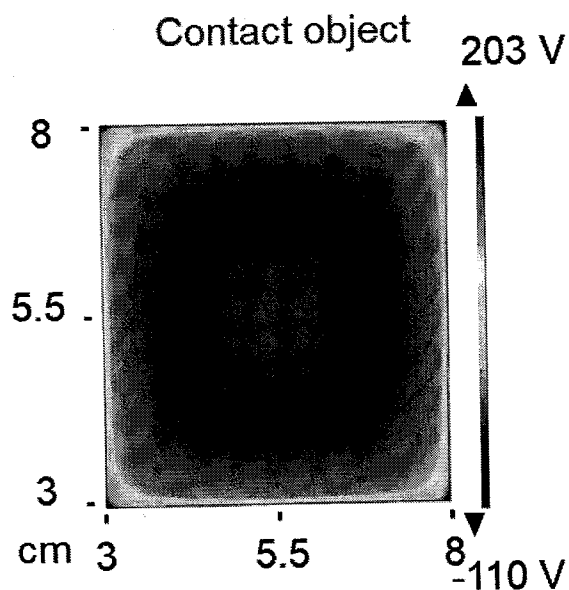


图 4-3 物体接触面的电势分布

Figure 4-3 Distribution of the voltage potential in the contacting surface of the object
摩擦层表面的电势分布如图 4-4 所示,

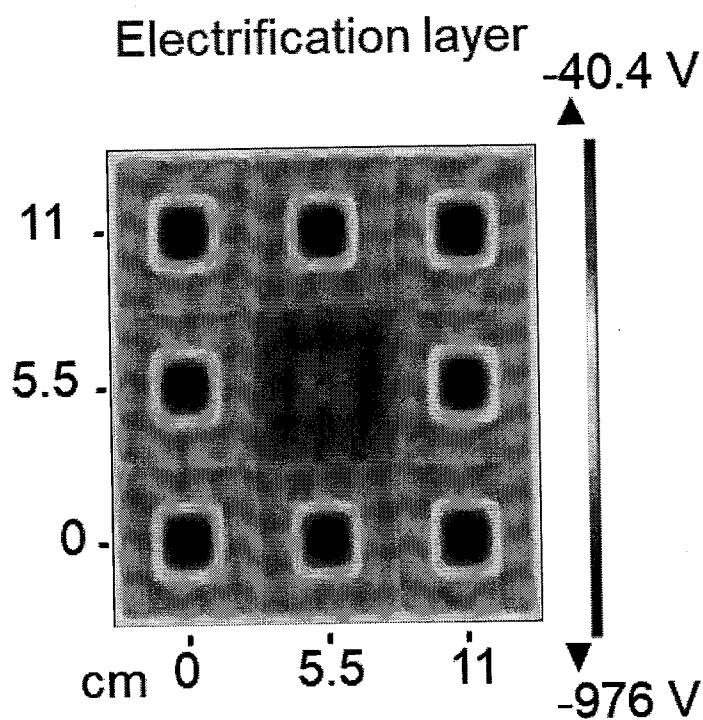


图 4-4 摩擦层的电势分布

Figure 4-4 Distribution of the voltage potential of the electrification layer
列电极层的电势分布如图 4-5 所示,

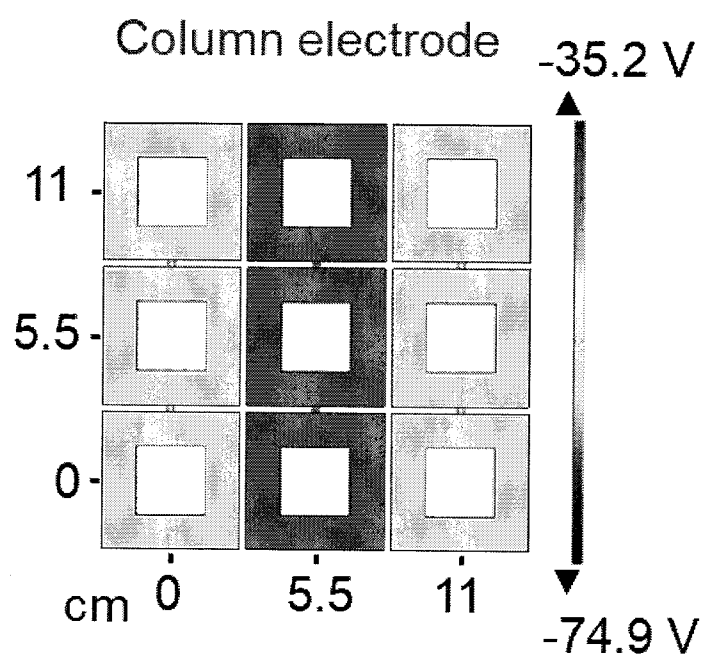


图 4-5 列电极层的电势分布

Figure 4-5 Distribution of the voltage potential of the column electrode layer

上层绝缘层的电势分布如图 4-6 所示，

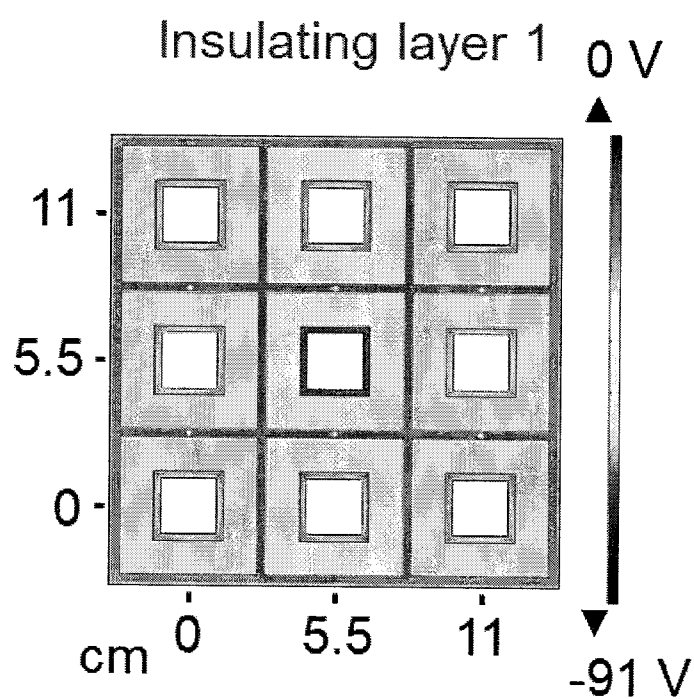


图 4-6 上层绝缘层的电势分布

Figure 4-6 Distribution of the voltage potential of the insulating layer 1

带孔屏蔽电极层的电势分布如图 4-7 所示，

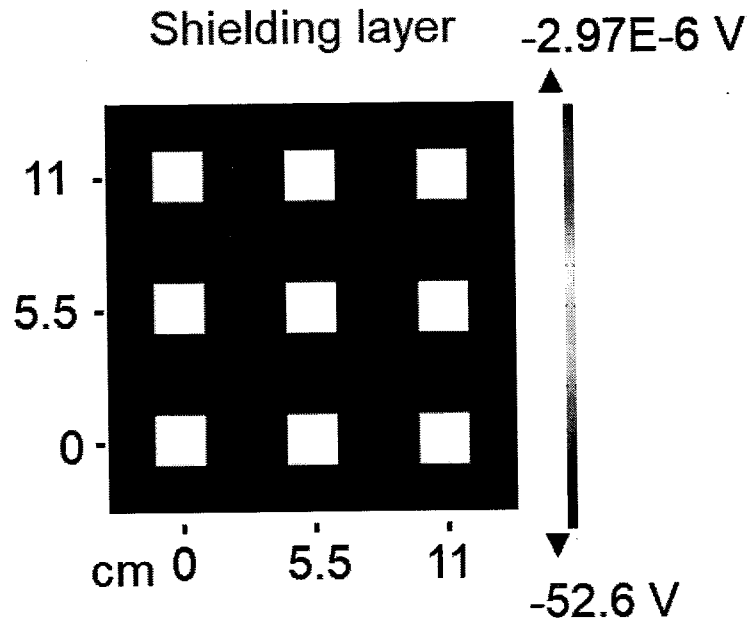


图 4-7 屏蔽层的电势分布

Figure 4-7 Distribution of the voltage potential of the shielding layer

下层绝缘层的电势分布如图 4-8 所示,

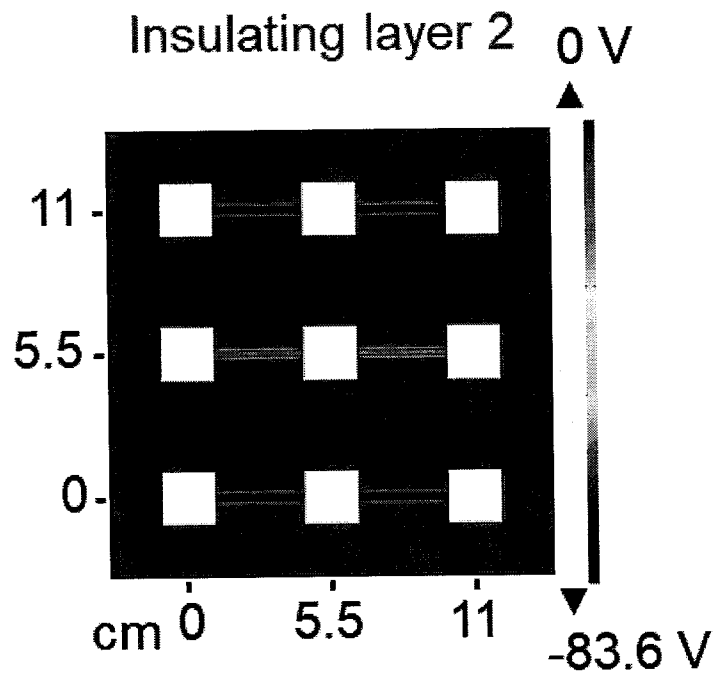


图 4-8 下层绝缘层的电势分布

Figure 4-8 Distribution of the voltage potential of the insulating layer 2

行电极层电极的电势分布如图 4-9 所示,

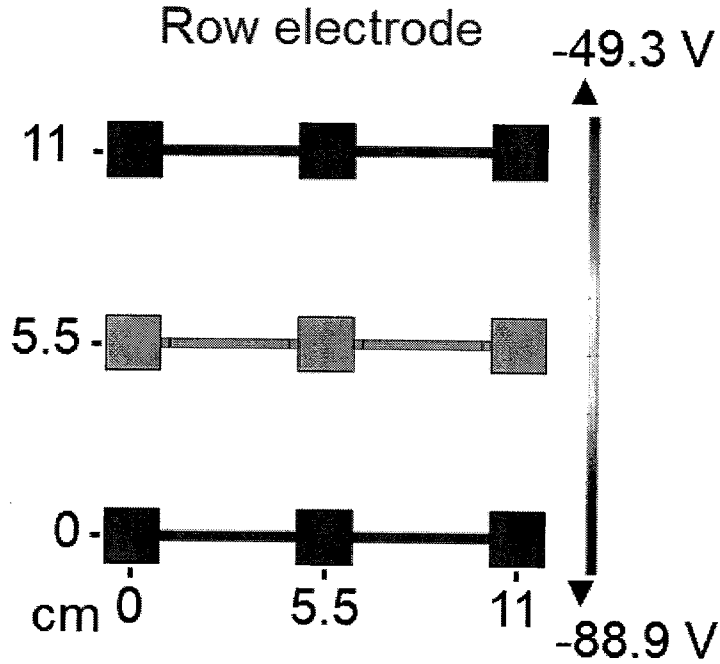


图 4-9 行电极层的电势分布

Figure 4-9 Distribution of the voltage potential of the row electrode layer

需要注意的是列电极层、带孔屏蔽电极层和行电极层的电势分布。在列电极层中， Y_2 电极的电势约为 -35.2 V ，显著的高于邻近的 Y_1 电极和 Y_3 电极，如图 4-5 所示。在行电极层中，如图 4-9 所示， X_2 电极的电势也显著的高于邻近的 X_1 电极和 X_3 电极。这种能观察到的显著的差异要归功于带孔屏蔽层的引入。图 4-7 所示的是带孔屏蔽层的电势分布，在仿真模拟计算时，带孔屏蔽层设定为接地，即电势为 0 V 。带孔屏蔽层在抑制干扰信号方面扮演着非常重要的角色。这里，我们定义 U 来表示电极所处位置的电势， ΔU 表示电极上的电势变化。同时选择 X_1 ， X_2 和 X_3 三条电极为例来说明传感阵列中传输的信号来源。图 4-10 显示了 X_1 ， X_2 和 X_3 三条电极在物体与相互嵌套式传感阵列接触和分离情况下的电极电势，横坐标表示 X_1 ， X_2 和 X_3 三条电极的位置，纵坐标表示电极电势。其中，图 4-10 左半部分表示物体与传感阵列接触情况下三条电极的电势，而右半部份表示物体与传感阵列分离一段距离时三条电极的电势。当接触物体与传感阵列分开一段距离后，三条电极上的电势也分别发生了变化，变化的电势可以用式 4.1 表示：

$$\Delta U = U_0 - U_x \quad (4.1)$$

这里 U_0 表示物体与传感阵列摩擦层接触时的电极电势， U_x 表示接触物体与传感阵列

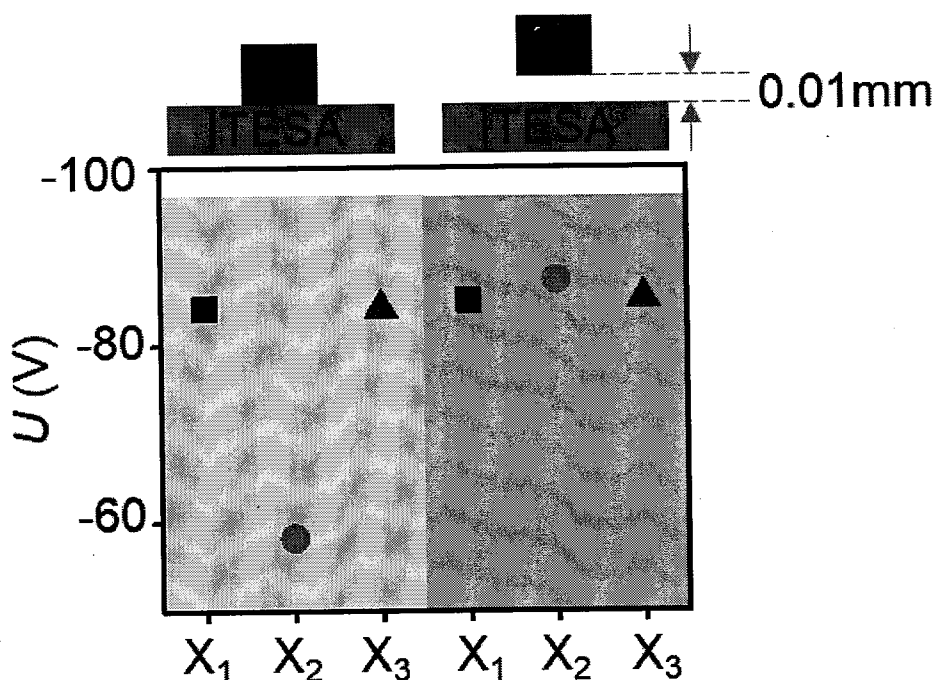


图 4-10 物体在接触和分离状态下 3 条行电极的电势值

Figure 4-10 Voltage potential of the X_1 , X_2 and X_3 electrode line on the contacting and separating state, respectively

摩擦层分离一定距离时的电极电势，比如图 4-10 中所示的 0.01 mm。在测量时，传感阵列中的一条信号通道接入静电计的正极端，而静电计的负极在测量时保持接地。当传感阵列以这种方式接入静电计时，静电计测量到的实际上就是电极的电势变化，即这里的 ΔU ，也就是说，测量到的传感阵列的输出信号是传感单元中电极的电势变化。在图 4-10 中，当接触物体从传感阵列的摩擦层材料表面离开 0.01 mm 时， X_2 电极的电势从 -58 V 降低为 -87 V，然而，在接触物体从传感阵列的摩擦层材料表面由接触位置移动到 0.01 mm 时， X_1 和 X_3 电极的电势基本上没有变化。这里用近端串扰(NEXT)表示信号的识别难度，亦即信号质量，用式 4.2 表示：

$$\text{NEXT} = \Delta U_n / \Delta U_s \quad (4.2)$$

其中， ΔU_s 表示位于物体与传感阵列接触位置正下方传感单元电极所在信号通道输出的电势变化， ΔU_n 表示传感阵列中除了接触位置正下方传感单元电极所在信号通道之外的其他信号通道输出势变化。NEXT 值越低表示传感阵列中信号干扰越小，传感阵列输出的信号质量越高，信号越容易被识别。^[92]图 4-10 中的 X_2 电极位于物体与传感阵列接触位置的正下方，输出的信号记 ΔU_s ，相应的， X_1 和 X_3 电极的输出信号分别

记为 ΔU_{n1} 和 ΔU_{n2} 。而 ΔU_s 相对 ΔU_{n1} 和 ΔU_{n2} 而言，至少是 ΔU_{n1} 和 ΔU_{n2} 两个数值中最大值的 100 倍，NEXT 值达到了 0.01，这表示传感阵列输出信号中存在极低的信号干扰，真实信号很容易与干扰信号区分开来，大大的降低了信号处理电路或者信号采集系统采集处理信号的难度。信号处理电路或者信号采集系统能够很容易的根据采集到的信号判断真实信号所在的信号传输通道位置，进而准确的定位出接触物体的位置。

4.3.2 屏蔽层设计对传感阵列信号输出的影响

通过前期的工作可以得知，屏蔽电极对传感阵列干扰信号的抑制有着非常显而易见的效果。然而，前期对于传感单元结构的研究并没有定量的评价引入的屏蔽电极对传感阵列干扰信号的抑制效果，只是定性的发现，发现引入屏蔽层后，物体与传感阵列接触-分离时，传感阵列输出的干扰信号被显著的抑制了。我们通过 COMSOL 模拟仿真的方式来定量的评价，在相互嵌套式结构传感阵列中，引入的屏蔽层对干扰信号的抑制效果，比较引入前和引入后的 NEXT 值的变化，从理论上证明屏蔽层的屏蔽作用。

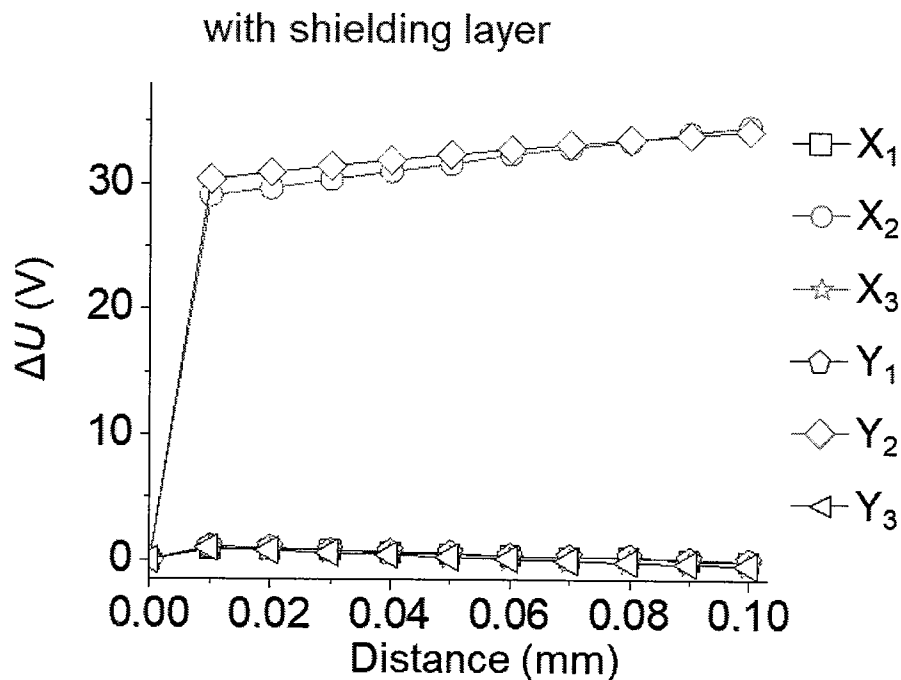


图 4-11 有屏蔽层情况下行列电极的模拟仿真计算得到的信号输出

Figure 4-11 Calculated signal output of the column electrode lines and row electrode lines
with shielding layer

同样以 3×3 基于接触起电效应的相互嵌套式传感阵列为例，通过设置 COMSOL

模拟仿真参数,在其他结构参数不变的情况下,研究相互嵌套式传感阵列在有无屏蔽层情况下全部信号传输通道的信号输出。通过明确电势变化 ΔU 的含义并且与电势 U 通过公式 4.1 统一,模拟仿真得到的电极电势变化即代表信号传输通道输出的信号幅值。这里设置接触物体以 0.01mm 的方式逐渐离开传感阵列摩擦层表面,并记录下每个状态下的 ΔU 值,结果如图 4-11 和 4-12 所示。

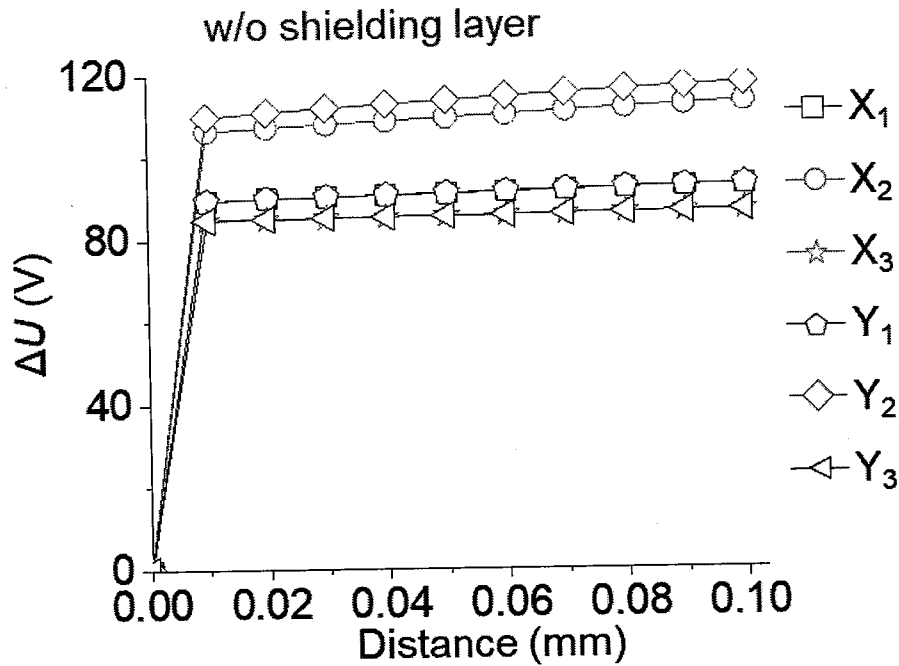


图 4-12 有屏蔽层情况下行列电极的模拟仿真计算得到的信号输出

Figure 4-12 Calculated signal output of the column electrode lines and row electrode lines without shielding layer

图 4-11 为相互嵌套式传感阵列中引入屏蔽层条件下的各信号通道信号输出,图 4-12 为相互嵌套式传感阵列中没有屏蔽层情况下各信号传输通道的信号输出。COMSOL 模拟仿真计算结果显示,在没有带孔屏蔽电极层的情况下,当物体与相互嵌套式传感阵列接触-分离后,位于接触位置下方的行电极和列电极的输出达到约 110 V,与此同时,其他未接触位置下方的行列电极输出约为 90 V,真实信号幅值与干扰信号幅值之比达到了 1.2:1, NEXT 约为 0.82,表明干扰信号与真实信号相当,虽然真实信号的输出较高,但是没有带孔屏蔽电极层的情况下,相互嵌套式传感阵列的输出信号质量很低,这给后续信号处理带来了很大的挑战。然而,在引入带孔屏蔽电极层的情况下,当物体与传感阵列接触-分离后,位于接触位置下方的行电极和列电极的

输出约为 30 V，此时，其他未接触位置下方的行列电极输出仅仅约为 0.3 V，真实信号幅值与干扰信号幅值之比达到了 100:1，NEXT 约为 0.01，这表明引入的带孔屏蔽电极层有效的抑制了干扰信号的输出。通过实验对照可以得知，带孔屏蔽电极层不仅抑制了同一层中电极之间及信号传输通道之间的相互影响，同时也显著的抑制了不同层之间行列电极之间的静电感应，传感阵列的真实信号输出与干扰信号输出之比从没有带孔屏蔽电极层的 1.2:1 提高至引入带孔屏蔽电极层后的 100:1，NEXT 从 0.82 降低至 0.01，信号质量提高了 80 多倍。这从理论上量化了带孔屏蔽电极层在信号干扰抑制的效果，证明带孔屏蔽电极层确实起到了抑制干扰信号的作用。

4.3.3 行列电极相对大小对传感阵列信号输出的影响

对于单个相互嵌套式传感单元而言，通过图案化设计，我们将行电极、带孔屏蔽电极以及列电极集成到了一个单元中。当物体与传感单元相互接触-分离时，传感单元能够同时向外传输行列信号，实现了传感单元的数目即为有效传感节点的数目，有效的利用了传感器件的二维平面空间。然而，传感单元的面积是有限的，传感单元中行电极、列电极的面积直接影响着传感阵列的行列信号输出幅值。如果行电极面积过大，相应地列电极的面积就较小，从而导致传感单元在物体接触-分离时，行电极所在信号传输通道输出较大的信号幅值，而列电极所在的信号传输通道输出较小的信号幅值。尽管引入的带孔屏蔽电极有效地抑制了干扰信号，但是因为列电极过小导致输出的信号幅值较弱，甚至与背底噪声相当，这给信号处理带来很大的难度。因此有必要对行列电极相对大小进行模拟仿真计算，使得传感器件行列信号输出幅值相当，从而降低信号处理的难度。我们通过 COMSOL 仿真模拟方式，对行列电极相对大小进行了一系列的设计和计算，找出行列电极面积之比的最佳值。

模拟仿真结果如图 4-13 所示，中间灰色区域表示物体与传感阵列接触位置，紫色实心方块表示行电极，蓝色带孔电极表示列电极，蓝色电极外源尺寸表示单个相互嵌套式传感单元大小。结果显示，随着行电极尺寸增加，行电极面积也相应增大，由于单个传感单元大小是固定的，所以列电极的面积在缩小。行电极与列电极的相对大小可以用式 4.3 表示：

$$S = \frac{A_R}{A_C} \quad (4.3)$$

这里用 S 表示行电极与列电极的面积比， A_R 表示行电极的面积， A_C 表示列电极的面

积。随着 S 的增大, 物体与传感单元接触-分离的模拟计算结果显示, 行电极的输出也在增大, 从约 5 V 提高至约 50 V, 相应地, 列电极的输出从约 50 V 降低至约 15 V。同时也发现, 在行列电极面积变化的过程中, 干扰信号的幅值基本没有多大变化, 保持在 0.3 V 左右。

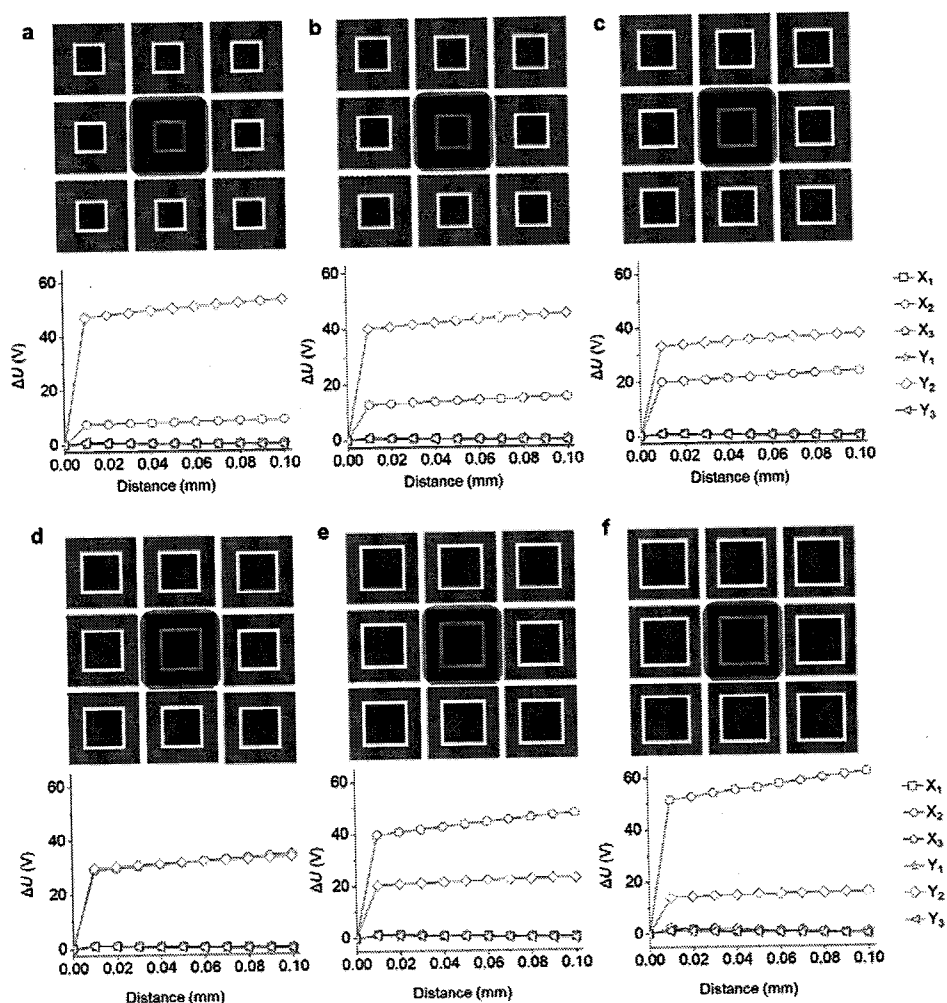


图 4-13 不同面积比情况下行列电极模拟仿真计算得到信号输出

Figure 4-13 Calculated signal output of the column electrode lines and row electrode lines when the area-ratio changing

为了更加直观的显示 S 从小增大的过程中行列电极的输出变化, 我们将接触位置处的行电极信号输出和列电极信号输出分别做图, 图如 4-14 和 4-15 所示, 可以更加清楚的看到, 随着 S 值从 0.35 提高到 2.58, 行电极的输出幅值逐渐增加, 而列电极的信号输出逐渐减少。在干扰信号输出幅值基本不变的情况下, 行电极输出信号幅值与列电极输出信号幅值相差不大时, 行列电极的输出信号 NEXT 值基本相等, 对信

号处理而言, 信号处理电路只需要一套方案即可满足传感阵列输出信号处理, 降低了信号处理电路设计的难度。

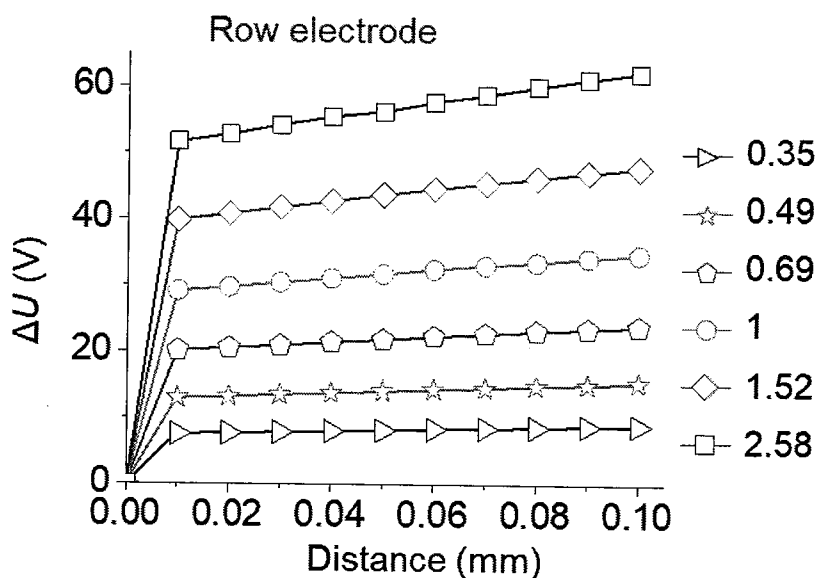


图 4-14 不同面积比下行信号输出对比

Figure 4-14 Signal output comparison of the row electrode lines when the area-ratio changing

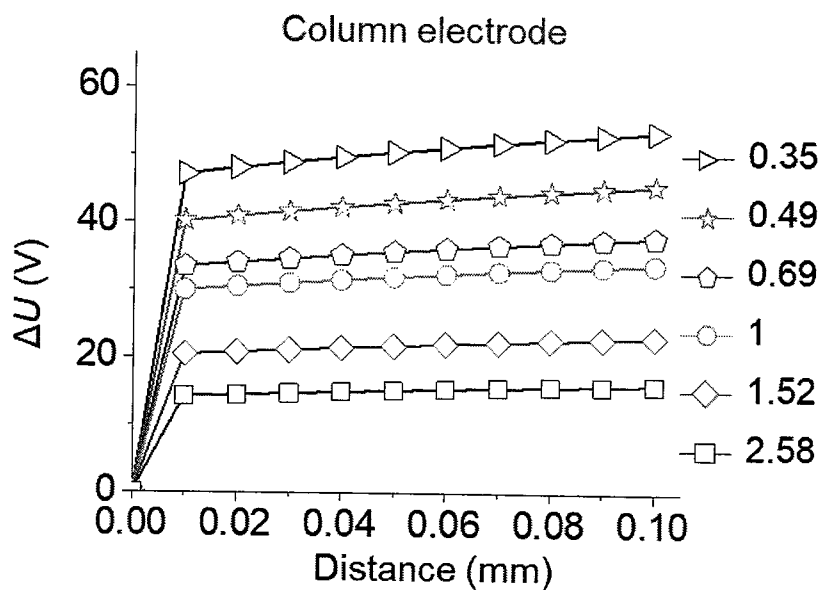


图 4-15 不同面积比下列信号输出对比

Figure 4-15 Signal output comparison of the column electrode lines when the area-ratio changing

基于此, S 为 1 是行列电极面积比的最佳值, 在此条件下, 行电极信号输出与列电极信号输出均在 30 V 左右, 行电极信号输出与列电极信号输出相差最小, 约为 5 V。

4.4 本章小结

本章利用有限元分析方法, 对相互嵌套式传感单元和阵列的结构和关键尺寸进行了模拟仿真。借助 COMSOL 有限元分析软件, 我们考察了屏蔽层有无、传感单元内部行列电极相对大小等对柔性薄膜传感阵列的信号输出的影响。得出的结论有:

(1) 带孔屏蔽电极层有效的抑制了传感阵列中的同层电极之间的相互干扰以及不同层电极之间的相互干扰。利用干扰信号输出幅值与真实信号输出幅值之比 NEXT 值表示传感阵列信号输出的质量, NEXT 值越高, 传感阵列输出的干扰信号幅值相对真实信号幅值而言越大, 传感阵列输出的信号质量越低。通过对照试验可以得到, 没有带孔屏蔽电极层的传感阵列模拟仿真得到的 NEXT 为 0.82, 引入带孔屏蔽电极层情况下传感阵列模拟仿真得到的 NEXT 为 0.01, 引入的带孔屏蔽电极层对干扰信号的抑制效果非常明显。

(2) 对相互嵌套式传感单元设计而言, 行电极面积与列电极面积之比为 1 是相互嵌套式传感单元内行列电极相对大小的最佳比例。通过一系列的仿真模拟计算得出, 电极的面积大小影响着传感阵列的信号输出幅值。对于单个相互嵌套式传感单元而言, 传感单元的尺寸是有限的, 并且由于传感单元集成了行列电极, 任何一种电极面积过大将会导致另一种电极面积过小, 从而导致信号输出幅值较弱, 增加了信号处理的难度。基于后续信号处理难度的考虑, 行列电极信号输出幅值相差最小为传感单元结构的最佳设计。COMSOL 仿真计算结果显示, 当行电极面积与列电极面积之比为 1 时, 行电极信号输出幅值与列电极信号输出幅值相差最小。

第五章 大面积自驱动柔性触觉传感阵列

5.1 前言

在 COMSOL 有限元分析软件对影响基于接触起电效应的相互嵌套式柔性传感阵列输出的模拟仿真计算结果的基础上,本章制作并研究了基于相互嵌套式传感单元结构的大面积自驱动柔性触觉传感阵列,测试了传感阵列的单点、多点接触情况下的信号输出,并考察了制作的传感阵列的一致性和稳定性。

触觉传感器通过物理接触的方式获取到触觉信号,并将触觉信号转换为电信号用来对接触信息进行表征。^[75]触觉传感器已经广泛的应用于机器人,安防,工业自动化,人工智能以及健康监护等领域。^[76,77]传统的触觉传感器的工作原理主要分为电容,压阻和压电这三类。^[78-87]然而,基于这三种原理的触觉传感器面临着一些问题。大多数触觉传感器使用的是半导体材料,如硅,镓等,这些半导体材料质地较硬并且易碎。^[88-90]虽然在过去的几十年中,有研究者们报道了一些柔性的触觉传感器,但是这些柔性的触觉传感器依赖特定的材料和制作工艺,这极大的限制了触觉传感器的尺寸以及在大面积场景下的应用。此外,这些触觉传感器都需要持续不断的提供能源供给。传感器件本身一旦失去供电,那么传感器件就没法工作,虽然每个传感器件的能耗比较低,但是大量的触觉传感器件累加起来消耗的能源也是相当可观的,这也随之带来了能源消耗的问题。^[91]而基于接触起电效应的触觉传感器将物理接触的机械信号直接转换为可供测量和分析的电信号,触觉传感器件无须外界供能,这从根本上解决了触觉传感器件需要能源供给的问题。这类触觉传感器件通常用高分子薄膜材料制作而成,因而具有非常好的柔性。同时,基于接触起电效应的触觉传感器非常灵敏,只要有物体触碰,哪怕是轻轻的触碰,传感器都能感知到并输出可供测量和分析的电信号。然而先前的基于接触起电效应的触觉传感器的研究均有比较严重的串行干扰问题,并且,先前的研究报道尚未展示基于接触起电效应的触觉传感器件和阵列在多点识别方面的应用。

在本章中,我们提出了一种基于接触起电效应的相互嵌套式的大面积自驱动柔性触觉传感阵列,在 COMSOL 有限元模拟仿真计算结果的基础上,设计了利用激光雕刻制作相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列的制作工艺,并对摩擦层材料和导

电层材料进行的表征,实际测量了制作的大面积自驱动柔性触觉传感阵列在单点触碰和多点触碰条件下的信号输出幅值,以实际实验证明了 COMSOL 模拟仿真的计算结果。此外,在 100K 次测试条件下,大面积触碰传感阵列信号输出几乎没有衰减,整个触碰传感阵列中单元信号输出最大相差 0.05,说明柔性触碰传感阵列制作工艺相当稳定。

5.2 大面积柔性传感阵列结构

5.2.1 柔性传感阵列结构及组成

根据 COMSOL 模拟仿真计算的结果,相互嵌套式结构的传感单元中行列电极的面积比为 1 时,传感单元与物体接触-分离情况下,行列电极的信号输出幅值相差不大,这对后续的信号处理而言难度最低,因此为最佳面积比。所以,在实际制作时,选择面积比为 1 作为传感单元行列电极的面积比。

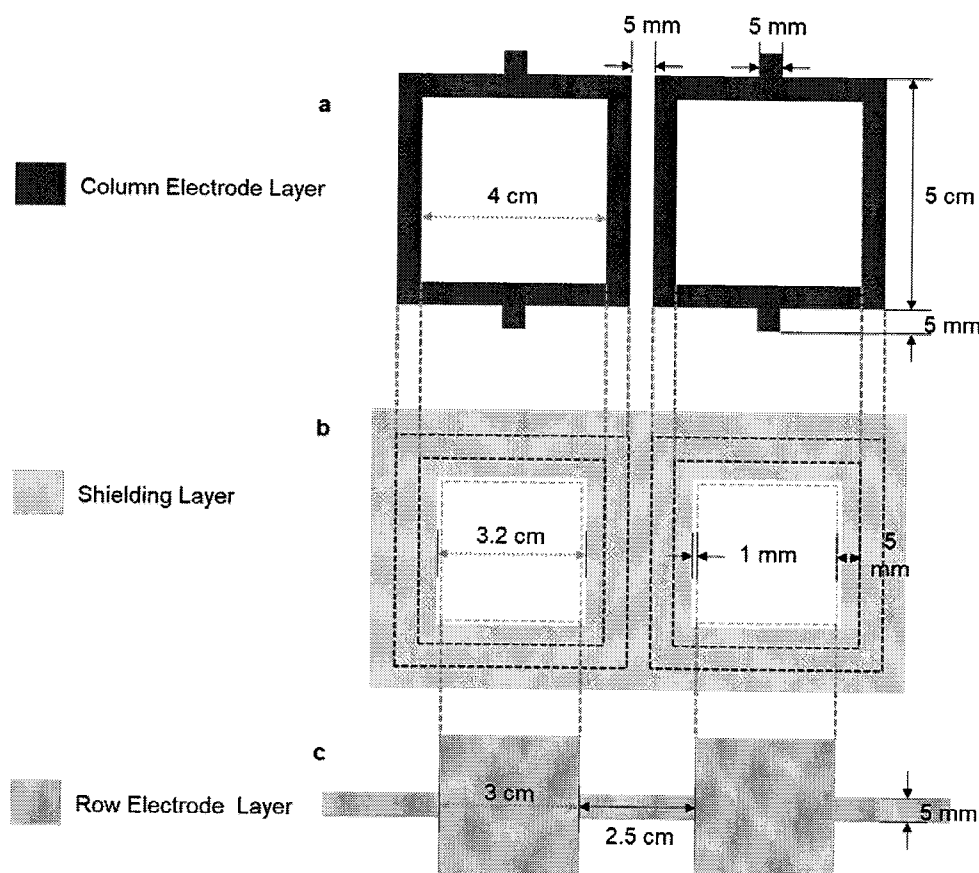


图 5-1 面积比为 1 时传感单元行列电极尺寸

Figure 5-1 The size of the column electrode and row electrode in the integrated unit when area-ratio is 1

相互嵌套式传感单元和阵列的尺寸如图 5-1 所示, 单个传感单元的大小为 $5 \times 5 \text{ cm}^2$, 相邻传感单元之间的间隔为 5 mm , 连接并导通相邻传感单元的连接线的宽度设计为 5 mm 。组成相互嵌套式传感阵列的行电极层、带孔屏蔽电极层、列电极层位于不同的层中, 并以图 3-11 的顺序依次从下到上层叠在基底层上。行电极层主要为实心方块电极及连接实心方块电极的连接线, 实心方块电极的尺寸为 $3 \times 3 \text{ cm}^2$, 相邻方块电极的连接线的尺寸为 $2.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$, 行电极层上一共排布了 8×8 总计 64 个电极, 每一行相互串联最终形成了 8 条行电极信号传输通道。带孔屏蔽电极层为一整层电极, 在这一层电极上有共计 8×8 总计 64 个方孔, 方孔的尺寸为 $3.2 \times 3.2 \text{ cm}^2$, 为了在层叠时避免与带孔屏蔽电极层下方的行电极层出现导通短路的情况, 带孔屏蔽电极层的孔的尺寸比行电极层的方块电极尺寸稍大。列电极层由中空方块电极组成, 方块电极外源尺寸为 $5 \times 5 \text{ cm}^2$, 即单个传感单元尺寸的大小, 方块电极内方孔的尺寸为 $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 。相邻中空方块电极相互之间的间隔为 5 mm , 由尺寸为 $0.5 \times 0.5 \text{ cm}^2$ 的连接线相互连接实现电性导通。列电极层由 8×8 总计 64 个中空方块电极组成, 每一列的中空方块电极相互串联, 形成了共 8 条列电极信号传输通道。带孔屏蔽电极层中的孔与行电极层中的方块电极、列电极层中的中空方块电极一一对应。带孔屏蔽电极层与行电极层之间绝缘层的外源尺寸与带孔屏蔽电极层一样, 该绝缘层上也排布着 8×8 总计 64 个方孔, 并与行电极层中的方块电极一一对应。方孔尺寸为 $3 \times 3 \text{ cm}^2$, 与行电极层中的方块电极尺寸一样, 避免行电极层与带孔屏蔽电极层之间出现导通的情况。带孔屏蔽电极层与列电极层之间绝缘层的外源尺寸也与带孔屏蔽电极层的外源尺寸相同, 也分布着 8×8 总计 64 个方孔, 并与列电极层中的中空电极一一对应。不同的是, 带孔屏蔽电极层与列电极层之间的屏蔽层的方孔尺寸为 $3.8 \times 3.8 \text{ cm}^2$, 略小于中空方块电极的孔的尺寸, 这种设计能有效的避免出现列电极与带孔屏蔽电极出现导通的情况。

制作好的 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列如图 5-2 所示, 相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列一共由基底层, 行电极层, 带孔屏蔽电极层, 列电极层, 摩擦层以及两层绝缘层共 7 层组成, 为了便于传感阵列的制作, 这里选择轻薄的红色无纺布作为基底层, 尺寸为 $60 \times 60 \text{ cm}^2$ 。导电层选用带有牛皮纸的双面带胶且双面导电的导电布材料作为电极材料, 利用激光雕刻将设计好的结构打印到导电布材料上, 形成了行电极层, 带孔屏蔽电极层以及列电极层。利用导电布自带的牛皮纸作为绝缘层, 一方面避免了导电布剥离后出现的卷曲、粘粘问题,

另一方面也避免了电极结构在粘附屏蔽层时出现的扭曲、变形、气孔等问题。摩擦层材料选择用特氟龙布材料，一方面特氟龙布有较强的强度，另外一方面特氟龙也是一种在摩擦电极序上位置比较靠后的材料，得电子能力较强，对接触物体材料的选择性较低，接触物体与特氟龙接触-分离时能在信号传输通道中检测到产生较大的信号输出。

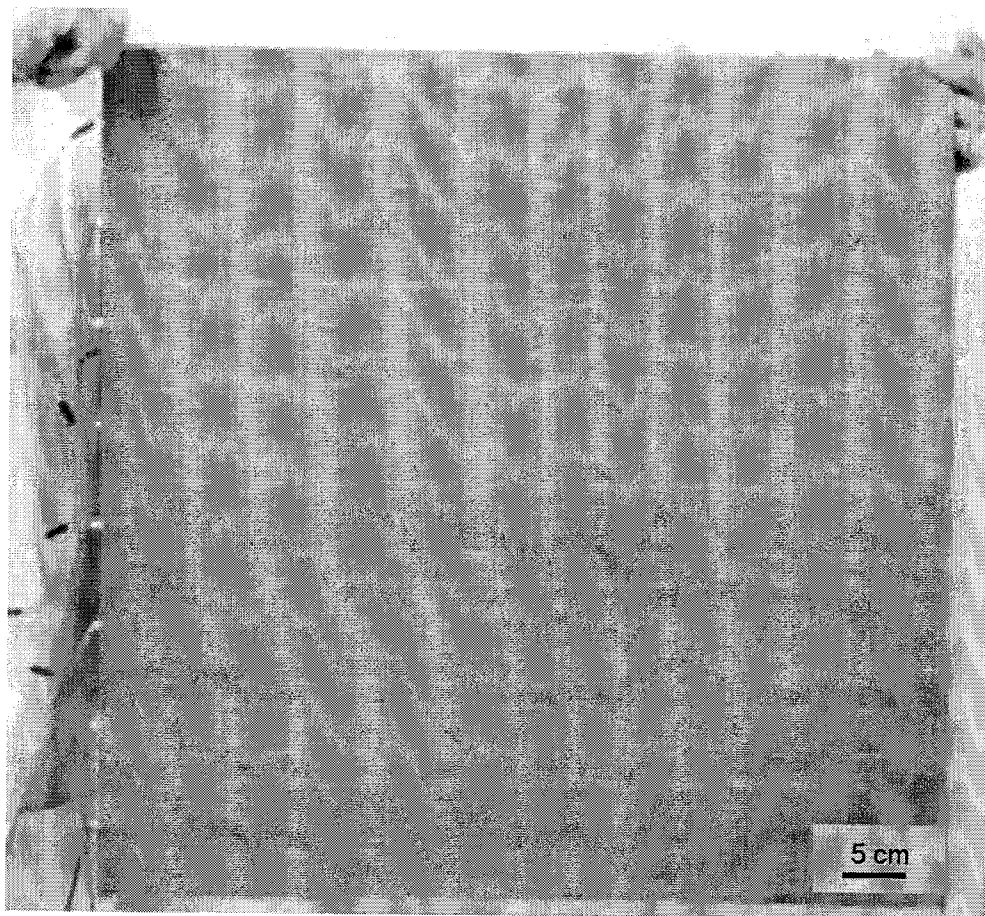


图 5-2 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列

Figure 5-2 Picture of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

每一行传感单元中的行电极相互串联组成一条行信号传输通道，每一列传感单元中的列电极相互串联组成一条列信号传输通道，带孔屏蔽电极层单独引出一条信号传输通道，因而，阵列为 8×8 的大面积自驱动柔性触觉传感阵列一共有 17 条信号传输通道，分别为 8 条行信号传输通道，8 条列信号传输通道和 1 条带孔屏蔽电极层信号传输通道。17 条信号传输通道用杜邦线转接，方便后续的信号采集。基底层为一整层的红色的无纺布基底层材料，起到支撑整个传感阵列的作用。最上面的为一整层的特氟龙布摩擦层材料，起到与物体接触-分离时产生摩擦电荷的作用。

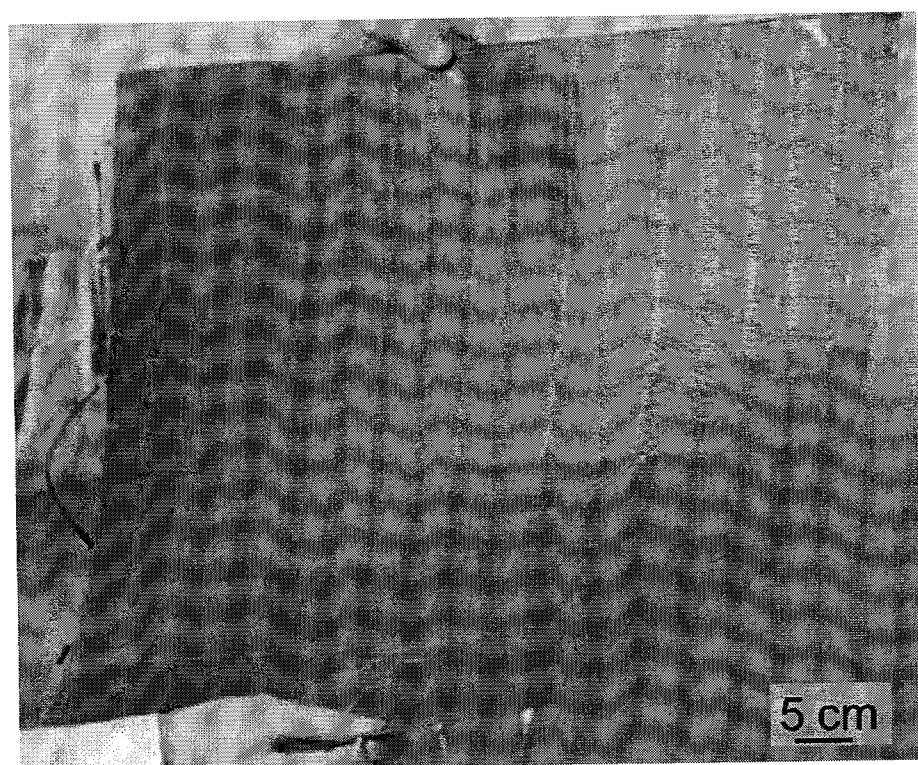


图 5-3 弯曲状态下的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列

Figure 5-3 Picture of the bent self-powered flexible sensing array

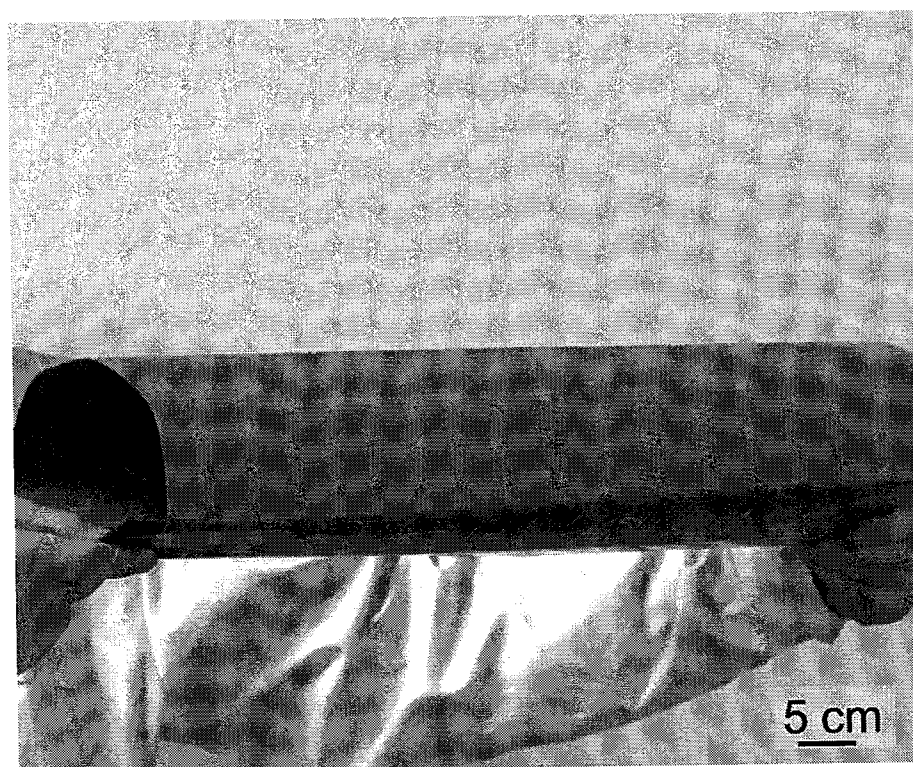


图 5-4 卷曲状态下的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列

Figure 5-4 Picture of the rolled self-powered flexible sensing array

由于摩擦层材料,电极材料和基底层材料均为很薄且柔性非常好的材料,制作完成的相互嵌套式的传感阵列具有非常好的柔性,如图 5-3 和 5-4 所示,可以看到制作完成的传感阵列厚度非常薄,能够很容易的弯曲和卷曲。

5.2.2 柔性传感阵列的制作方法

与传统的用微纳加工方法制作传感器不同,我们利用激光雕刻的方法制作了大面积基于接触起电效应的相互嵌套式柔性触觉传感阵列。利用激光雕刻制作大面积自驱动柔性触觉传感阵列的方法实施工艺简单,相对传统的微纳加工制作工艺而言,具有速度快,流程简单,成本低廉的显著优势。利用激光雕刻制作大面积自驱动柔性触觉传感阵列时,无需微纳加工制作工艺中的光刻掩模板,更无需使用光刻胶,只需要将设计好的矢量图通过激光雕刻的方式在材料上雕刻出来即完成了制作。

制作时,利用矢量图形制作工具软件设计好行电极层、带孔屏蔽电极层以及列电极层,由于使用导电布上自带的牛皮纸作为绝缘层材料,所以在设计时同样将绝缘层材料的关键参数一同考虑进去。利用矢量图形工具软件配合激光雕刻的方法可以快速的制作出 8×8 的大面积自驱动柔性触觉传感阵列。将列电极层与位于列电极层和带孔屏蔽电极层之间的绝缘层利用激光雕刻同时制作完成,将带孔屏蔽电极层与位于带孔屏蔽电极层和行电极层之间的绝缘层利用激光雕刻同时制作完成,将行电极层单独制作完成。将制作好的三层电极材料依次层叠,揭去行电极层背后的牛皮纸材料,贴上红色无纺布材料,最后在列电极表面贴上特氟龙布材料,即完成了大面积自驱动柔性触觉传感阵列的制作。

5.3 大面积柔性传感阵列的性能研究

在制作好的基于接触起电效应的大面积自驱动柔性触觉传感阵列基础上,我们对摩擦层材料以及导电布电极材料用扫描电子显微镜(SEM)进行了表面形貌的微观表征。作为柔性触觉传感阵列,需要考察传感阵列在弯曲状态下电极材料的导电性能,因此我们也考察了导电布材料导电性能随弯曲状态改变的变化情况。另外,在单点识别和多点识别的应用场景下,我们测量了大面积自驱动柔性触觉传感阵列的信号输出幅值,并用图表对比显示了真实信号输出幅值与干扰信号输出幅值。此外,对制作好的大面积自驱动柔性触觉传感阵列,我们还测试和表征了传感阵列中传感单元输出的一致性,并在一定测试强度下表征了传感阵列信号输出稳定性。

5.3.1 柔性传感阵列摩擦层材料表征

借助 SEM 设备，我们表征了摩擦层特氟龙布材料的表面结构，如图 5-5 所示，



图 5-5 特氟龙材料表面的扫描电镜照片

Figure 5-5 SEM image of the surface of the PTFE material

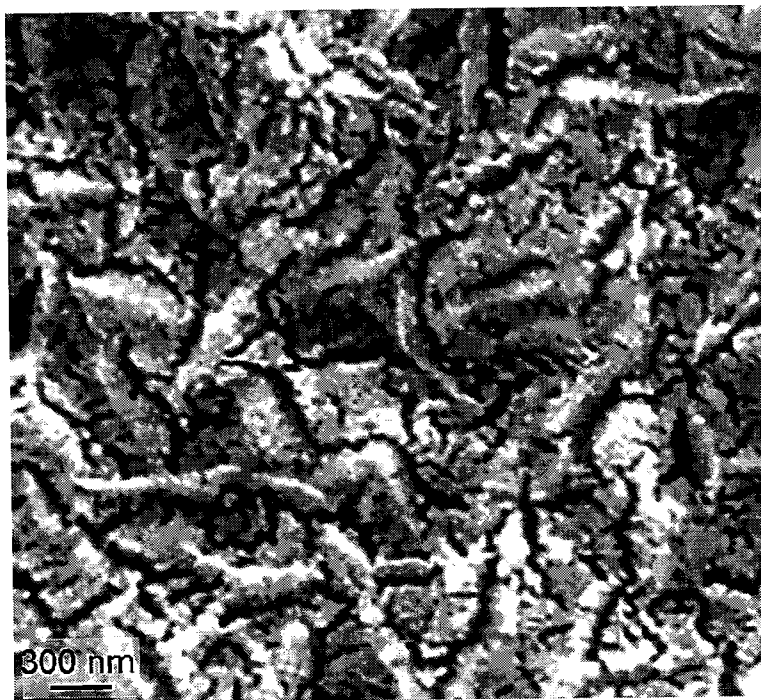


图 5-6 特氟龙材料表面的扫描电镜微区照片

Figure 5-6 SEM image of the surface of the PTFE material

可以清楚的看到，特氟龙布材料中有明显的纺织布的痕迹，纺织布纤维宽度约为 100 μm，纤维相互交织最后形成了纺织布的纤维骨架。在纤维骨架的表面涂覆一层特氟龙材料，即形成了最终看到的特氟龙布材料。同时也可以观察到，涂覆的特氟龙材料

覆盖了整个的纤维骨架，无论是纤维表面还是纤维骨架之间的空隙位置，并形成一层致密的特氟龙薄膜。表面覆盖的特氟龙材料的微观形貌如图 5-6 所示，可以看到，在特氟龙材料表面可以看到纳米级别的表面形貌结构，这种纳米级的表面结构有助于特氟龙材料在与物体接触时在特氟龙材料表面有效的形成摩擦电荷，有助于传感阵列输出较高的信号幅值。

此外，我们还对特氟龙布材料进行了水接触角的实验，结果如图 5-7 所示，可以看到，当水滴滴在特氟龙布材料表面时，特氟龙布与水滴的接触角达到了 114.5° ，这表明特氟龙布材料是疏水材料，疏水的特氟龙布材料能够确保大面积自驱动柔性触觉传感阵列实现防水，从而保护位于摩擦层材料下方的电极免于因为水的浸入而出现的短路情况。

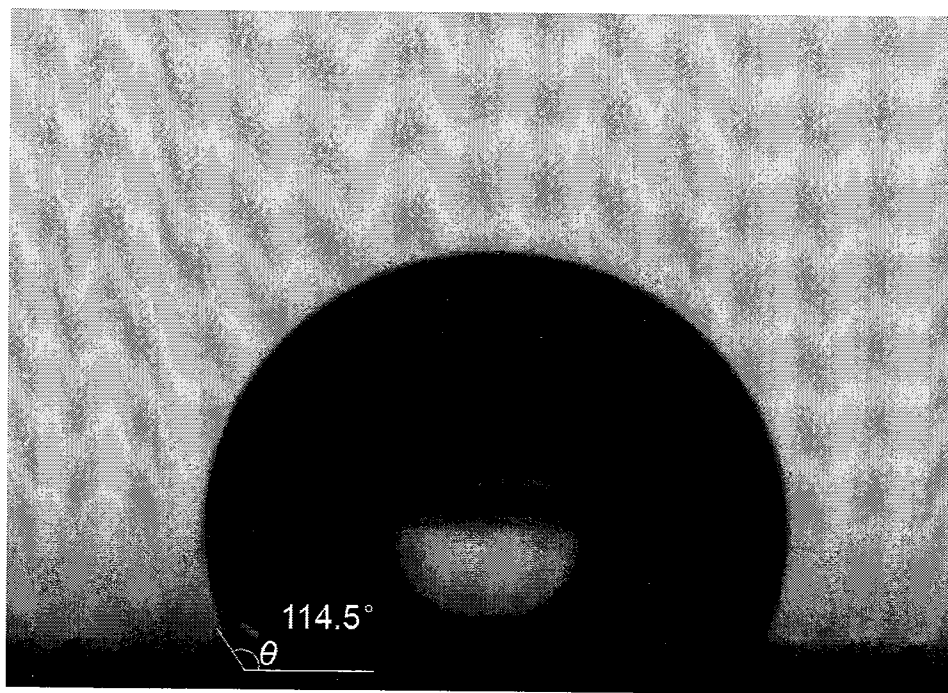


图 5-7 特氟龙布的水滴接触角测试结果

Figure 5-7 Contact angle test of the PTFE material

5.3.2 柔性传感阵列导电层材料表征

我们也对导电布电极材料用 SEM 进行了表面微观形貌表征，如图 5-8，5-9 和 5-10 所示。图 5-8 为导电纤维材料表面微观形貌。可以看到的是，在导电纤维表面布满了金属颗粒，并且与纤维紧密的粘附在一起，形成了一层由导电金属颗粒组成的导电

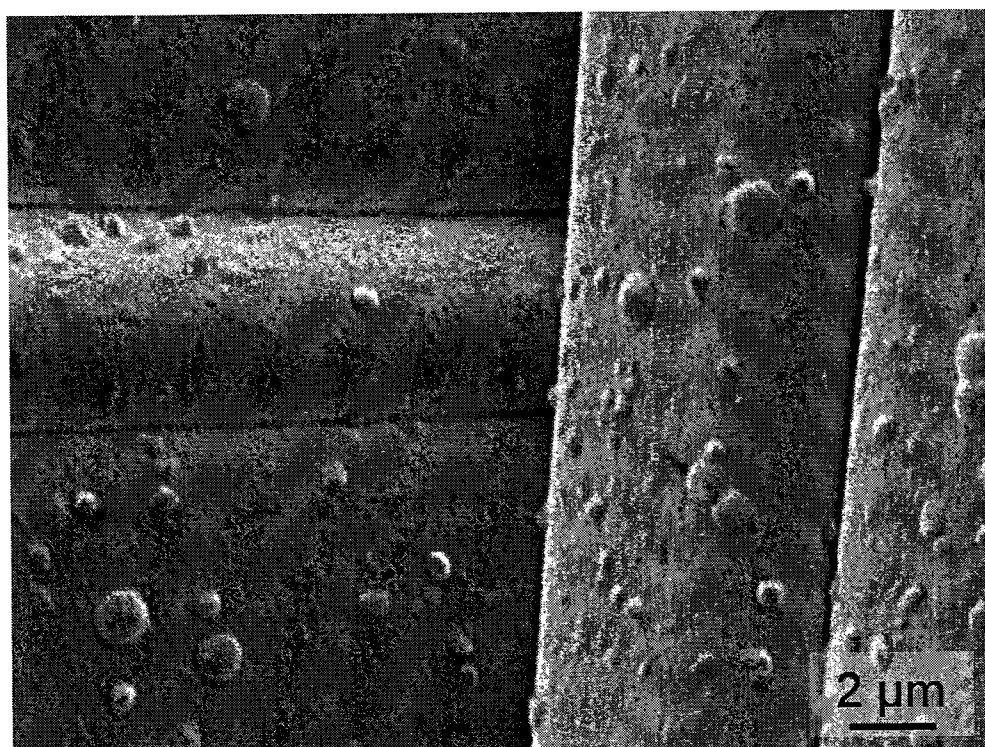


图 5-8 导电布电极材料扫描电极照片

Figure 5-8 SEM image of the conductive cloth material

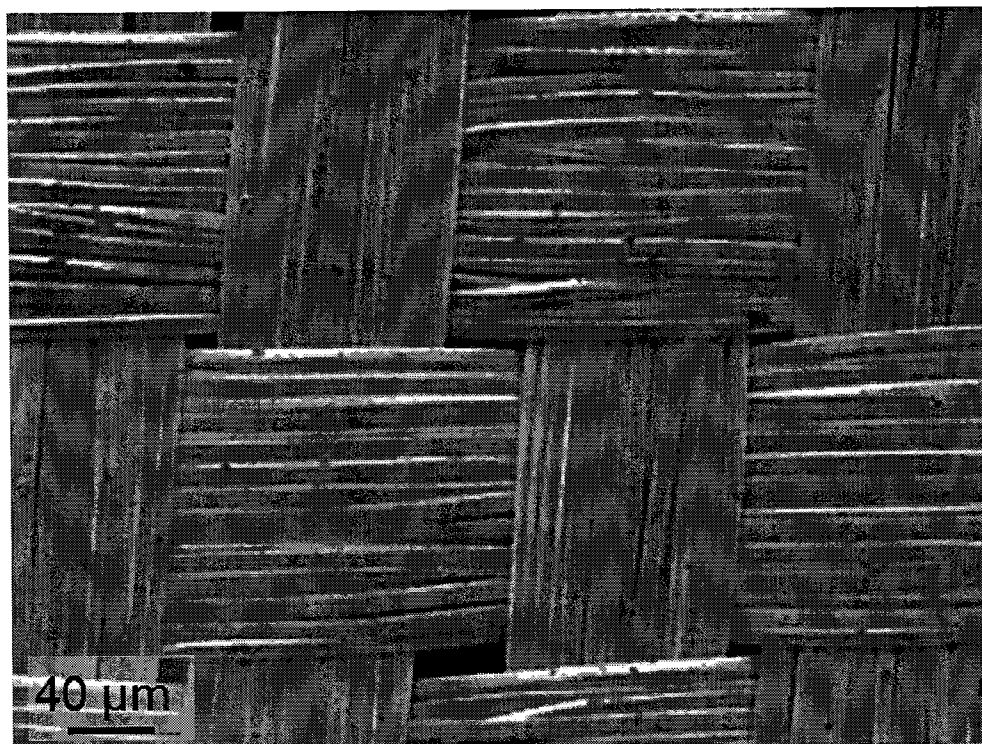


图 5-9 导电布电极材料的正面微观形貌

Figure 5-9 SEM image of the positive microstructure of the conductive cloth



图 5-10 导电布电极材料的断面微观形貌

Figure 5-10 SEM image of the cross-sectional microstructure of the conductive cloth 层。这层导电层使得原本绝缘的纤维材料具有导电的能力。图 5-9 为导电布电极材料的正面微观形貌表征，图 5-10 为导电布电极材料的断面微观形貌表征。可以看到，导电布电极材料中每根导电纤维截面直径约为 $5\ \mu\text{m}$ ，一束导电纤维由约 3 层每层约 14 根的导电纤维组成，通过一束束纤维相互交织组成了导电布的纤维骨架。纤维束中的导电纤维彼此接触，束与束之间相互搭桥，最终实现了整体的电学连接。

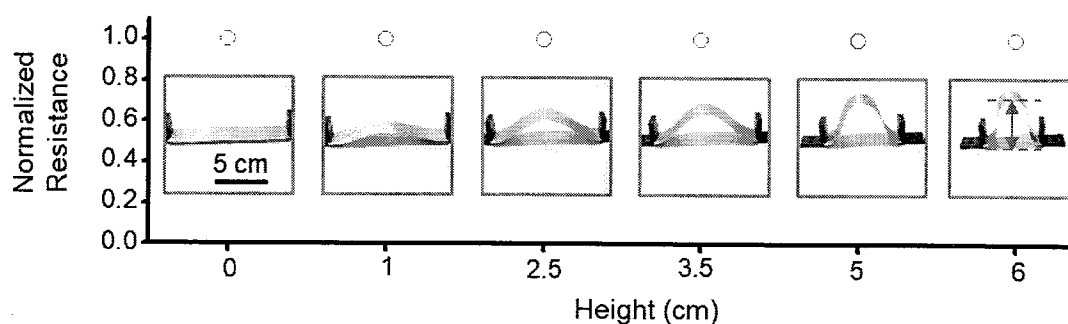


图 5-11 导电布电极材料的导电性能测试

Figure 5-11 Conducting performance test of the conductive cloth

同时我们也对导电布电极材料的导电性能随弯曲状态的变化做了测试，这里我们用弯曲的高度表示导电布电极的弯曲状态，如图 5-11 红色标注。以测得阻值的归一

化值为纵坐标, 弯曲高度为横坐标做图, 结果如图 5-11 所示, 尽管导电布电极材料弯曲程度不断增加, 纵坐标值几乎没有变化, 基本上为 1, 可以看到导电布电极材料的导电性能优异, 几乎不受到弯曲状态的影响, 这可以保证大面积自驱动柔性触觉传感器件在任何弯曲状态下的电极的导电性能始终处在几乎相同的状态, 排除电极导电性能变化而对信号输出带来的影响。

5.3.3 柔性传感阵列单点测试结果

静电计测量得到的 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列的单点数据如图 5-12 和 5-13 所示。

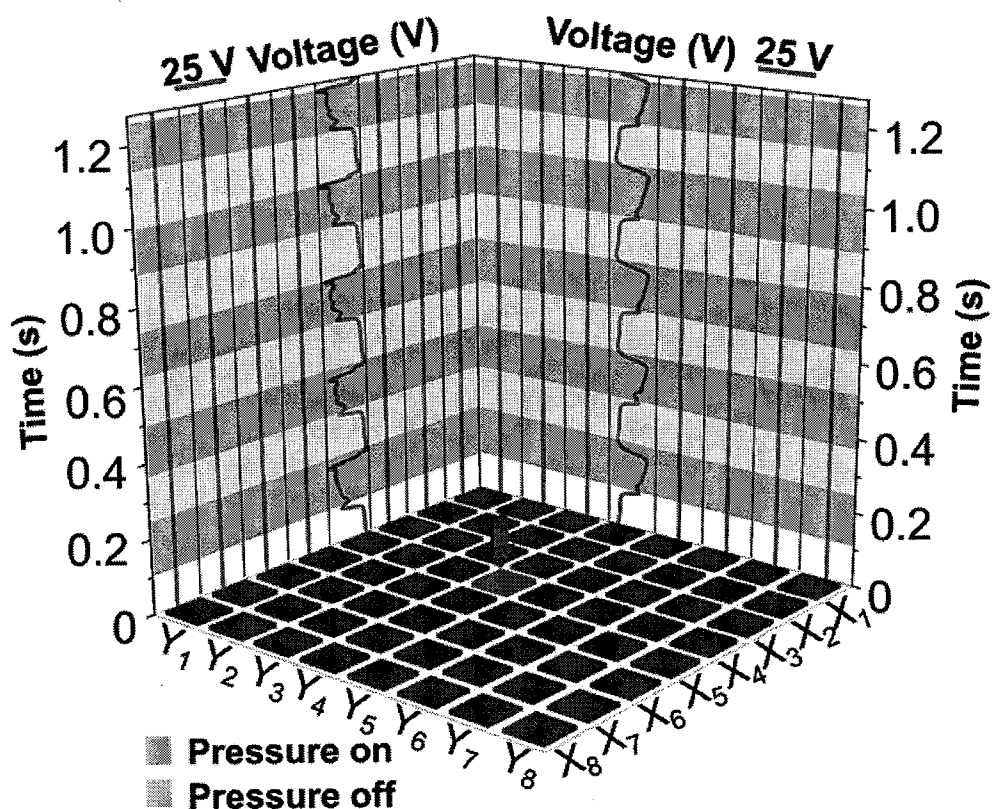


图 5-12 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列中心点测试结果

Figure 5-12 Central single point test of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

图 5-12 为大面积自驱动柔性触觉传感阵列的中心点测试结果, 以 8 条行信号传输通道和 8 条列信号传输通道的测试结果分别为 X 轴和 Y 轴, 以时间为 Z 轴做图。在实际测量时, 物体与传感阵列接触的位置为 (X_4, Y_4) , 对应于位于接触点摩擦层材

料下方的 X_4 信号传输通道和 Y_4 信号传输通道。在测试时，物体以约 4 Hz 的频率与大面积自驱动柔性触觉传感阵列接触-分离，16 个通道的测试结果如图 5-12 所示，位于接触点位置下方的 X_4 和 Y_4 信号传输通道上可以观察到明显的 5 个方波，幅值约为 25 V 的电压信号，而其他的为接触位置的下方的信号传输通道的幅值约为 0.25 V，图 5-12 中几乎观察不到。大面积自驱动柔性触觉传感阵列的真实信号输出幅值与干扰信号输出幅值的比值达到了约 100:1，NEXT 值低至 0.01，这和 COMSOL 理论计算的结果基本上一致。值得注意的是，虽然物体与传感阵列不断的发生接触-分离，但是干扰信号的幅值基本上很稳定，处在 0.25 V 附近，这也从实验上再次证明了带孔屏蔽电极对干扰信号抑制效果。

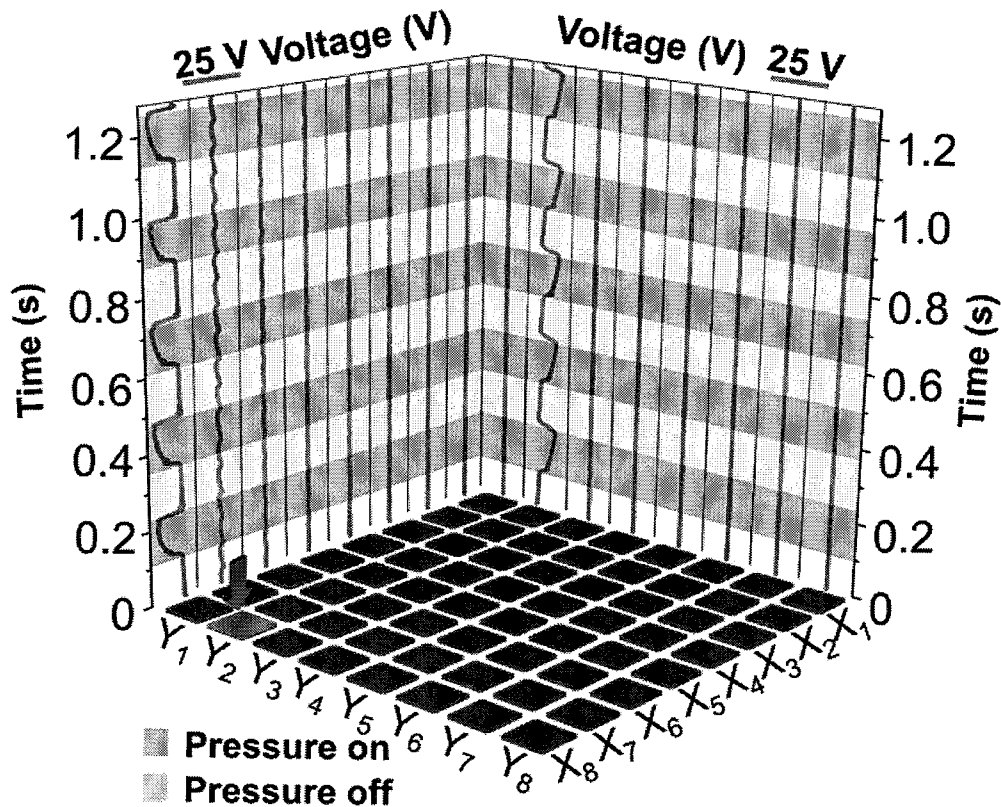


图 5-13 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列中心点测试结果

Figure 5-13 Side single point test of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

在大面积自驱动柔性触觉传感阵列中心点测试完成后，我们还对传感阵列进行了边缘点测试，如图 5-13 所示。当物体与位于 (X_8, Y_2) 的传感单元接触时，我们同样测

量了物体在以 4 Hz 的频率与传感阵列接触-分离情况下传感阵列的信号输出。可以看到的是,位于接触位置下方的 X_8 行电极信号传输通道和 Y_2 列电极信号传输通道上输出了明显 5 个方波信号,幅值约为 25 V,位于未接触位置下方的信号传输通道上没有测量到明显的信号,即使是位于接触点最邻近的 X_7 行信号传输通道以及 Y_1 , Y_3 列信号传输通道上输出的信号幅值最高约为 0.25 V,真实信号与干扰信号的幅值比也达到了约 100:1, NEXT 值低至约 0.01,干扰信号同样被显著的抑制了。

5.3.4 柔性传感阵列多点测试结果

对于制作的 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列,我们除了进行了单点测试外,还进行了多点测试。在多点测试情况下,我们对标记为 1, 2, 3, 4 的四个区域进行了连续测试,如图 5-14 所示。标记为 1 的长条形物

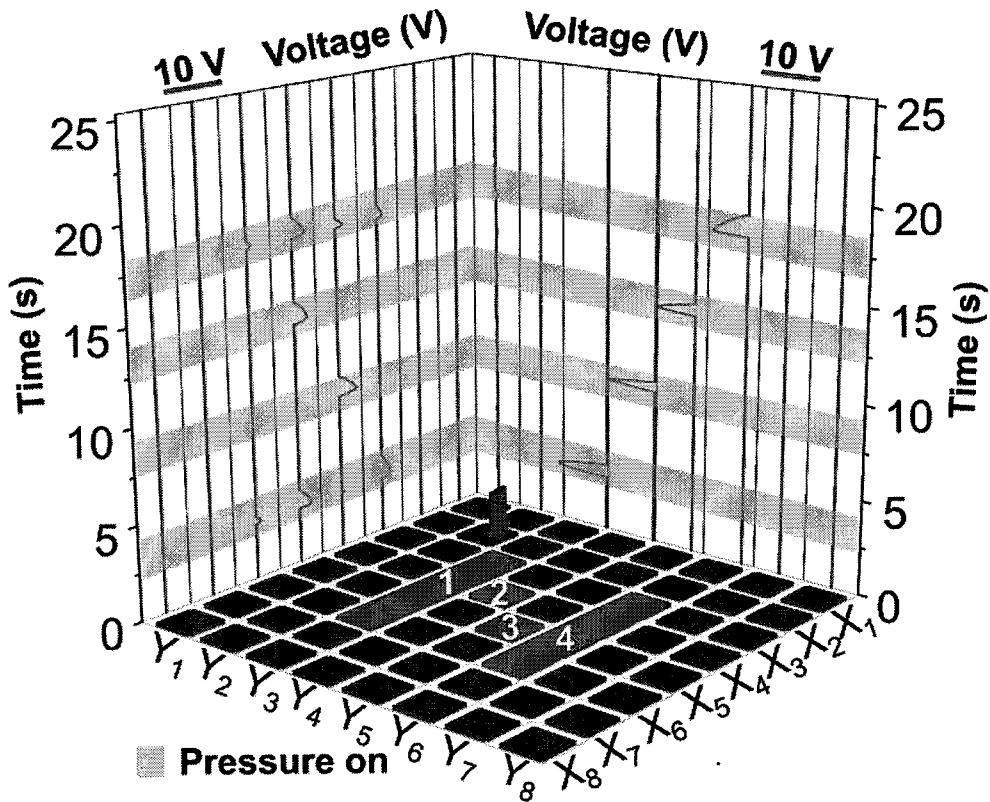


图 5-14 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列多点测试结果

Figure 5-14 Multi-points test of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

体接触的位置为 $X_3 \sim X_6$ 行信号传输通道和 Y_3 列信号传输通道上的交叉位置处传感

单元组成的区域, 标记为 2 的矩形物体接触的位置为 X_4 行信号传输通道和 Y_4 列信号传输通道上的交叉位置处传感单元区域, 标记为 3 的矩形物体接触的位置为 X_5 行信号传输通道和 Y_5 列信号传输通道交叉位置处的传感单元区域, 标记为 4 的长条形物体接触的位置为 $X_3 \sim X_6$ 行信号传输通道和 Y_6 列信号传输通道上的交叉位置处传感单元组成的区域。需要注意的是, 当多个传感单元同时被接触时, 位于接触位置下的信号传输通道输出的信号幅值存在不一致的现象, 比如当标记为 1 的长条形物体与传感阵列接触时, $X_3 \sim X_6$ 行信号传输通道输出的信号幅值存在不一致的现象, X_4 和 X_6 行信号传输通道输出的信号幅值要显著的高于 X_3 和 X_5 行信号传输通道, 造成这种现象的原因可能是长条形物体有一定的弧度, 因而在与传感阵列中的传感单元接触时, 无法保证与每个传感单元都是一样的接触情况。同样也是因为这个原因, 标记为 4 的长条形物体与传感阵列接触时也出现了同样的情况。此外, 图 5-14 显示的物体与大面积自驱动柔性触觉传感阵列接触-分离时测量得到的波形是三角形波形, 而不是图 5-12 和 5-13 中显示的方形波形, 出现这种现象的原因是因为多点信号测量所用的设备是多通道信号同步测量系统, 而不是单点信号测量时使用的静电计。多通道信号同步测量系统的阻抗要远低于静电计的阻抗, 并且静电计是一种电容式的电学信号测量设备, 而多通道信号同步测量系统是一种电阻式的电学信号测量设备, 并且由于设备硬件的限制, 多通道信号同步测量系统采集数据的采样率要低于静电计采集数据的采样率, 这些原因造成了用多通道信号同步测量系统采集数据时, 信号的波形呈现三角形而不是方形。图 5-14 显示的波形不仅包含了物体与大面积自驱动柔性触觉传感阵列接触的位置和信号输出幅值信息, 同时也包含了物体与大面积自驱动柔性触觉传感阵列接触的先后时间顺序, 因而可以从图中很容易的判断出物体与传感阵列接触的轨迹信息, 这也是大面积自驱动柔性触觉传感阵列应用于检测运动物体的基本依据。

5.3.5 柔性传感阵列稳定性和一致性测试结果

在同样的测试条件下, 测量 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列中的每个传感单元的信号输出幅值, 我们得到了大面积自驱动柔性触觉传感阵列的一致性测量结果, 如图 5-15 和 5-16 所示。图 5-15 为大面积自驱动柔性触觉传感阵列的 64 个行电极一致性测试结果。归一化计算如式 5.1 所示,

$$N = \frac{V}{V_{Max}} \quad (5.1)$$

其中, N 表示归一化计算后得到的结果, V 表示测量得到的信号幅值, V_{Max} 表示所有测量得到的信号幅值中的最大值。在相同的测试条件下, 将测量到的 64 个行电极信号输出幅值归一化计算得到的结果 N 作为 Z 轴坐标, 以行电极在每行信号传输通道的位置作为 X 轴坐标, 以行信号传输通道序号为 Y 坐标, 将结果绘制成图即得到图 5-15。图 5-15 的结果显示, 在相同的测试条件下, 64% 的行电极信号输出幅值是相等

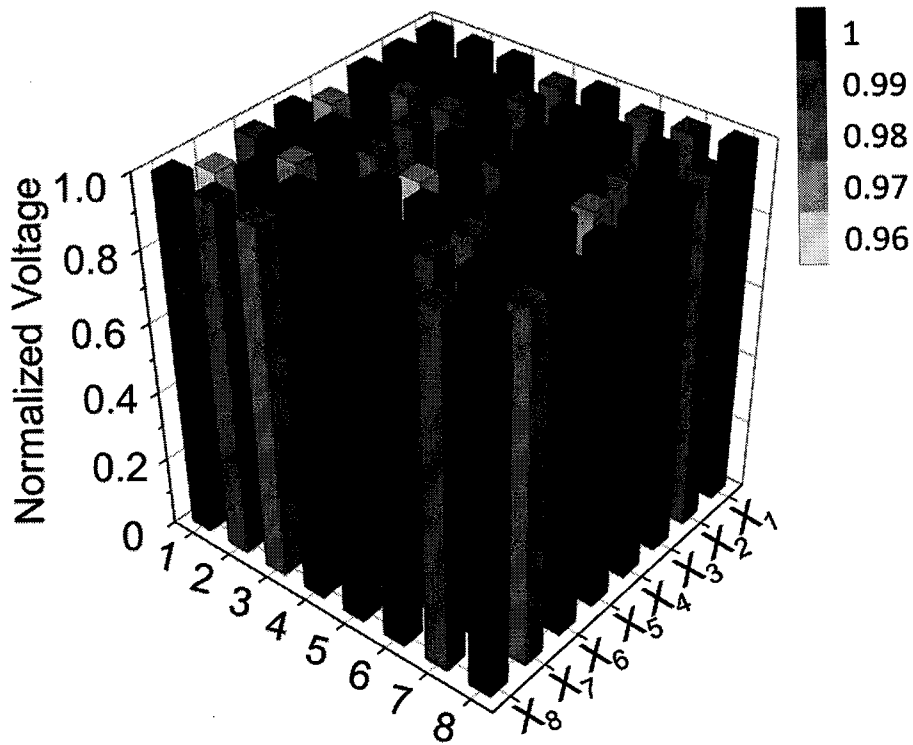


图 5-15 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列一致性测试结果

Figure 5-15 Consistency test of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

的, 并为输出的最大值。相对 64 个行电极信号输出的最大值, 92% 以上的行电极信号输出幅值与该最大值的相差比例在 0.02 以内, 行电极信号输出幅值与该最大值的相差比例 0.03 的仅占了 8%, 64 个行电极的信号输出幅值中最小值与最大值之间的相差比例仅为 0.04。大面积自驱动柔性触觉传感阵列 64 个行电极信号输出幅值相差比例在 5% 以内, 说明大面积自驱动柔性触觉传感阵列行电极信号输出具有非常好的一致性。

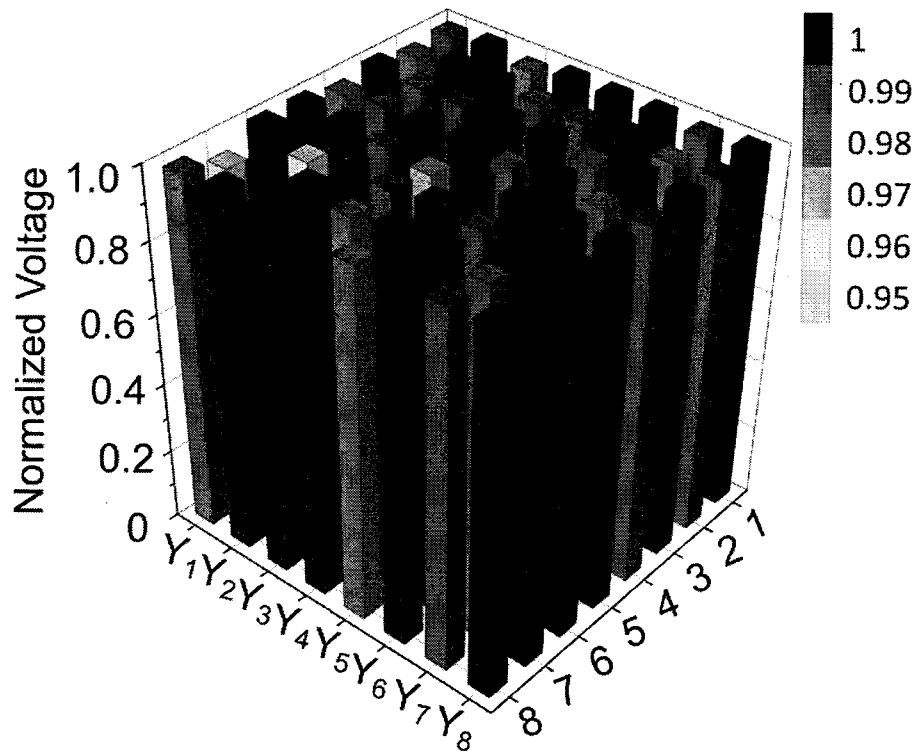


图 5-16 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列一致性测试结果

Figure 5-16 Consistency test of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

图 5-16 显示了大面积自驱动柔性触觉传感阵列中的 64 个列电极的一致性测量结果。在图表绘制时，同样对测量得到的列电极的信号输出幅值以式 5.1 进行了归一化处理，以更加直观的比较各个列电极的信号输出。与图 5-15 不同的是，图 5-16 以列电极在每列信号传输通道的位置作为 Y 轴坐标，以列信号传输通道序号为 X 坐标。结果显示，大面积自驱动柔性触觉传感阵列的 64 个列电极中，56% 的列电极信号输出幅值相等，且为最大输出，95% 的列电极信号输出幅值差值与该最大值的相差比例在 0.02 以内，列电极信号输出幅值与该最大值的相差比例超过 0.03 的仅为 5%，其中，64 个列电极信号输出的最小值与最大值之间的相差比例最大为 0.05。大面积自驱动柔性触觉传感阵列 64 个列电极信号输出幅值相差比例在 5% 以内，也说明大面积自驱动柔性触觉传感阵列中列电极信号输出具有非常好的一致性。将列电极信号输出一致性结果与行电极信号输出的一致性结果对比可知，64 个列电极信号输出幅值中输出幅值较低的位置与 64 个行电极信号输出幅值中输出幅值较低的位置是相对应

的。经分析,造成行列电极信号输出存在差值的可能的原因有:1.摩擦层材料中的特氟龙涂覆层分布不均匀,2.摩擦层材料表面的摩擦电荷分布不均匀。

此外,我们还对 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列信号输出的稳定性进行了表征。测试时,物体以 10Hz 的频率与大面积自驱动柔性触觉传感阵列单元接触-分离。对传感单元中行电极信号传输通道和列电极信号传输通道测量得到的信号幅值进行归一化计算,如式 5.1 所示,并以 N 值作为 Y 轴

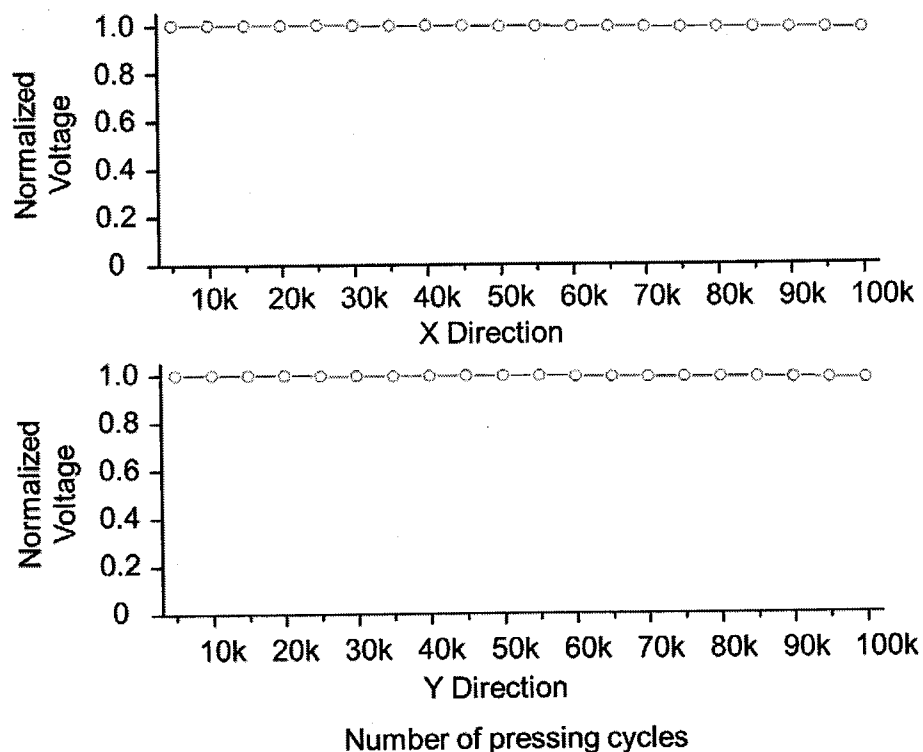


图 5-17 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列稳定性测试结果

Figure 5-17 Stability test of the 8×8 triboelectrification based self-powered flexible sensing array

坐标,以更加直观的显示输出信号幅值的对比。X 轴坐标则为物体与大面积自驱动柔性触觉传感单元的接触-分离次数。结果显示,在持续不断的接触 100K 次下,与物体接触的传感单元的行电极信号输出几乎没有出现衰减,列电极的信号输出基本上也没有变化,这表明传感阵列的摩擦层材料具有非常好的起电性能和耐磨性能,因而使得传感阵列的信号输出具有非常好的稳定性。

5.4 本章小结

本章利用激光雕刻的方法制作了 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列，并对摩擦层材料和电极材料进行了微观表征，同时实际测量了大面积自驱动柔性触觉传感阵列在单点触碰、多点触碰情况下的信号输出幅值，考察了制作的传感阵列信号输出的一致性以及在 100K 次测试条件下传感阵列信号输出的稳定性。得出的结论有：

(1) 利用激光雕刻制作大面积自驱动柔性触觉传感阵列的方法实施工艺简单，相对传统的微纳加工制作工艺而言，具有速度快，流程简单，成本低廉的显著优势。利用激光雕刻制作大面积自驱动柔性触觉传感阵列时，无需微纳加工制作工艺中的光刻掩模板，更无需使用光刻胶，只需要使用矢量图行制作工具软件设计行电极层结构、带孔屏蔽电极层结构、列电极层结构以及相应的绝缘层结构，将设计好的结构输入激光雕刻机中，以激光雕刻的方式在导电布电极材料上雕刻出设计的结构即完成了每一层的电极制作，制作速度快，无需经历微纳加工制作工艺中的匀胶、光刻、显影、沉积、去胶等繁琐耗时的流程。此外，激光雕刻方法可以制作出米级尺寸的自驱动柔性触觉传感阵列，这是微纳加工制作工艺无法实现的。

(2) 大面积自驱动柔性触觉传感阵列能够准确的识别接触物体的位置信息及运动轨迹信息。实验中我们对大面积自驱动柔性触觉传感阵列进行单点测试和多点测试，测试的结果表明，物体与传感阵列接触-分离时，位于接触点下方的行列信号传输通道输出的信号幅值显著的高于未接触位置下方信号传输通道输出的信号幅值，NEXT 值低至 0.01，这表明按压点处的输出信号能够很容易的与干扰信号区分开来，通过信号处理电路或者信号采集系统分析，能够很容易的定位出物体的位置。此外，对于大面积自驱动柔性触觉传感阵列而言，传感阵列输出的信号不仅包含物体接触的位置信息，还包含了物体接触的先后信息，通过对物体位置信息和接触先后信息的综合分析即可得到物体运动的轨迹信息。

(3) 通过激光雕刻工艺制作的大面积自驱动柔性触觉传感阵列具有非常好的一致性和稳定性。通过测量比较传感阵列中所有的行电极信号输出和列电极信号输出可知，行电极信号输出和列电极信号输出具有很好的一致性，即物体与传感阵列的接触位置变化对传感阵列的信号输出几乎无影响。此外，经过 100K 次测试后，传感阵列的信号输出幅值几乎没有衰减，说明了大面积自驱动柔性触觉传感阵列信号输出稳定

性非常好。

第六章 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列

6.1 前言

本章利用层叠式制作方法制作了高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列,设计以一种小信号处理电路,并结合该处理电路测试了该传感阵列信号输出。

作为将物理信号,化学信号,机械信号等转换为可测量的电信号的触碰传感器件是人机交互过程中非常重要并且不可缺少的一环。^[93-95]虽然最近几十年中研究者们先后报道了各种各样基于各种原理的触觉传感器,这些报道的触觉传感器均存在着一个共同的问题,即能量消耗的问题。^[96-100]尽管研究者们一直致力于降低触觉传感器的功耗,单个触觉传感器件的功耗已经降至 μW , 甚至 nW 的水平,但是并没有从根本上解决触觉传感器需要耗能的问题,大量的触觉传感器累计所消耗的能量仍然是相当可观的。^[101-107]最近,有研究者报道了一种基于接触起电和静电耦合效应原理的新型触觉传感器件,这种新型的触觉传感器件能够在无需供电的情况下将物体与传感器件接触的机械信号直接转换成可测量和分析的电信号,并且具有非常高的灵敏度。^[108-109]触觉传感器件在工作时无需外界供能,从根本上解决了触觉传感器件需要能源消耗的问题。同时该触觉传感器件的制作工艺相对前述的触觉传感器件而言较为简单快捷。将触觉传感器件排布成触觉传感阵列,不仅可以采集到物体与传感阵列接触时的位置、轨迹信息,同时还可以采集到物体与传感阵列接触的表面形貌及轮廓信息。对于基于接触起电和静电耦合效应的触觉传感阵列而言,有报道记载的最小的单元尺寸为 $5\times 5\text{ mm}^2$,然而这种阵列设计却是将每个传感单元都引出一根信号传输通道,因而极大的限制了传感阵列的阵列数目,最大的阵列数目也仅仅为 16×16 。另外一种阵列排布是将同行的传感单元相互串联最后引出一条信号传输通道,每列的传感单元相互串联最后引出一条信号传输通道,但是不足的是研究者并未对传感单元做任何设计,虽然传感单元尺寸缩小为 $5\times 5\text{ mm}^2$,由第三章分析可知,实际测量时传感阵列的有效节点数要小于传感阵列的单元数目。此外,该结构的传感阵列也未做任何的屏蔽处理,导致传感阵列的信号干扰比较严重,传感阵列的有效分辨率仅仅达到了 2 dpi。因此,急需将基于接触起电和静电感应耦合原理的触觉传感器自驱动特点和前述触觉传感器的高分辨率特点结合,研究出一种能够实现高分辨率采集自驱动触觉传感阵列。

在本章中,我们提出了一种高分辨率相互嵌套式自驱动柔性薄膜触觉传感阵列,

首次将基于接触起电和静电感应耦合原理的触觉传感阵列尺寸缩小至 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ ，传感阵列中传感单元的密度达到了 $400 \frac{\uparrow}{\text{cm}^2}$ ，阵列分辨率达到了 50 dpi，是目前报道的最高分辨率的 25 倍。此外，我们还设计了一种小信号处理电路，该小信号处理电路能够有效的从嘈杂的环境中提取出小信号并放大，经过小信号处理电路处理后，传感阵列输出信号幅值达到了约 0.4 V，NEXT 值低至 0.05。

6.2 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列

6.2.1 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列结构及组成

高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的结构如图 6-1 所示。

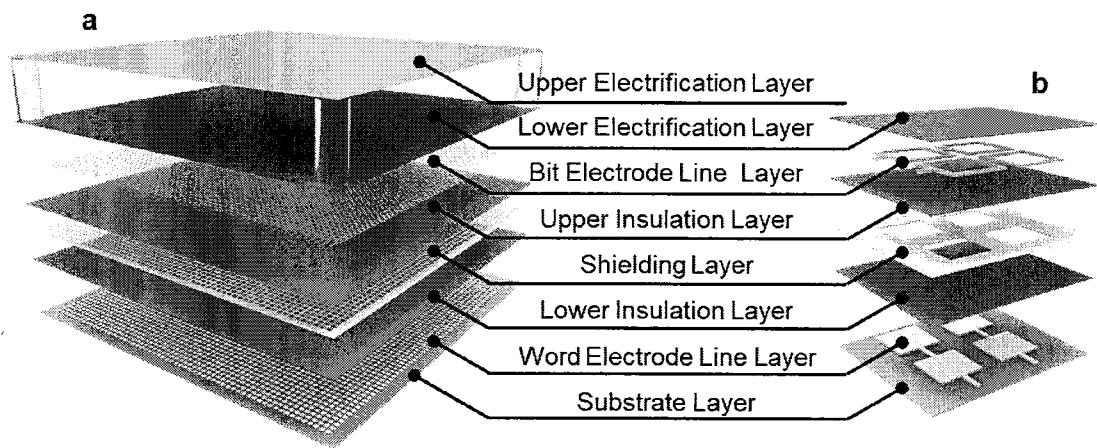


图 6-1 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的结构

Figure 6-1 Illustration of the structure of the high-resolution, thin-film, self-powered touching sensing matrix

图 6-1a 显示了由 3600 个相互嵌套式传感单元组成的 60×60 传感阵列，自下而上分别为基底层，字线电极层，下层绝缘层，屏蔽电极层，上层绝缘层，位线电极层，下层起电层以及上层起电层。整个高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的上下起电层之间存在 5 mm 高度的间隙。图 6-1b 为不包含上层起电层的传感单元结构，从上到下依次为下层起电层，位线电极层，上层绝缘层，屏蔽电极层，下层绝缘层，字线电极层以及基底层，与相互嵌套式传感单元结构一样，字线电极层和位线电极层位于下层起电层下方，每一个字线电极和位线电极一一对应。字线电极为实心的方形结构，60 个字线电极相互串联形成了一条字线信号传输通道，60 条字线信号传输通道组成了字线电极层。位线电极为中空的正方形结构，60 个位线电极相互串联形成了一条位

线信号传输通道, 60 条位线信号传输通道组成了位线电极层。屏蔽电极层位于字线电极层和位线电极层之间, 并且用上层绝缘层和下层绝缘层来阻断屏蔽电极层与字线电极层和位线电极层之间可能的电性连接, 避免屏蔽电极层与字线电极层或者位线电极层出现短路的情况。摩擦层, 位线电极层, 上层绝缘层, 屏蔽电极层, 下层绝缘层和字线电极层依次堆叠在基底层上即组成了自驱动传感阵列的下半部分。

图 6-1 显示的高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列结构的优点是, 当物体与传感阵列接触时, 物体通过上层起电层与下层起电层发生接触, 也就是说无论外界接触物体是什么材质, 物体与传感阵列之间的接触最终都转化为了上层起电层与下层起电层之间的接触, 这种设计巧妙的排除了因接触物体材质的变化而给传感阵列信号输出幅值带来的影响。

在实际制备时, 我们选择使用 PI 材料作为基底层材料, 使用聚氨酯材料(TPU)作为上层起电层材料, 选用 Ag 作为电极材料并选择电子束蒸发(E-beam vapor)作为电极的加工制备方法, 选择聚对二甲苯薄膜(Parylene C)作为绝缘层材料以及下层起电层材料, 并选择用化学气相沉积(CVD)方法作为 Parylene C 的制备方法。

6.2.2 高分辨率自驱动触碰传感阵列的工作原理

高分辨率自驱动触碰传感阵列的工作原理基于接触起电和静电感应的耦合效应。

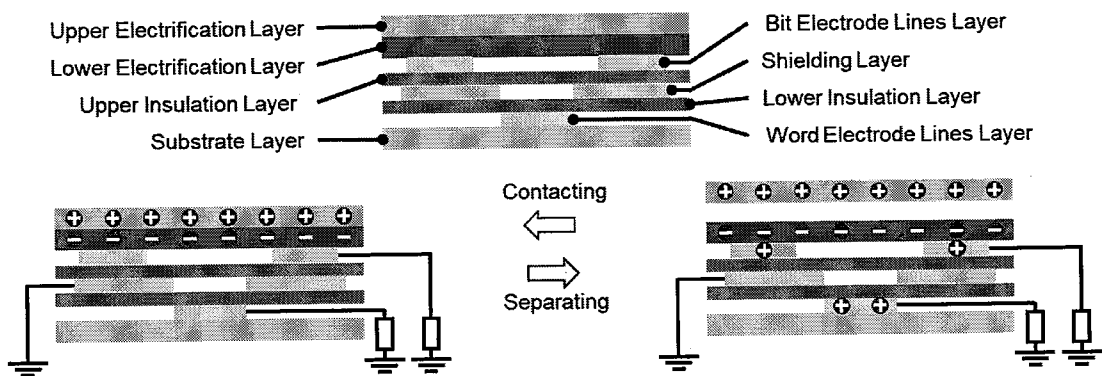


图 6-2 高分辨率自驱动触碰传感阵列的信号产生原理

Figure 6-2 Signal generation principle of the reported sensing matrix

如图 6-2 所示, 当物体反复的与高分辨率自驱动触碰传感阵列接触-分离时, 传感阵列的 TPU 薄膜在物体的作用下与摩擦层的 Parylene C 材料也在反复的接触-分离, TPU 薄膜相对于 Parylene C 材料而言, 在摩擦电极序上的位置要比 Parylene C 靠前, 因而由于接触起电效应, TPU 薄膜表面将带正电荷, Parylene C 材料表面将带负电荷。由于接触起电和静电感应耦合的作用, 当 TPU 薄膜与 Parylene C 薄膜反复的接触-分

离时，位于摩擦层下方的字线电极和位线电极即向外输出可以被测量的电压信号。

6.2.3 高分辨率自驱动触碰传感阵列位置定位原理

高分辨率自驱动触碰传感阵列的基本传感单元结构是相互嵌套式结构的传感单元，即单个的传感单元集成了一个字线电极，一个位线电极和一个屏蔽电极。当高分辨率自驱动触碰传感阵列中的传感单元在受到物体按压时，TPU 薄膜将会与 Parylene C 薄膜接触。

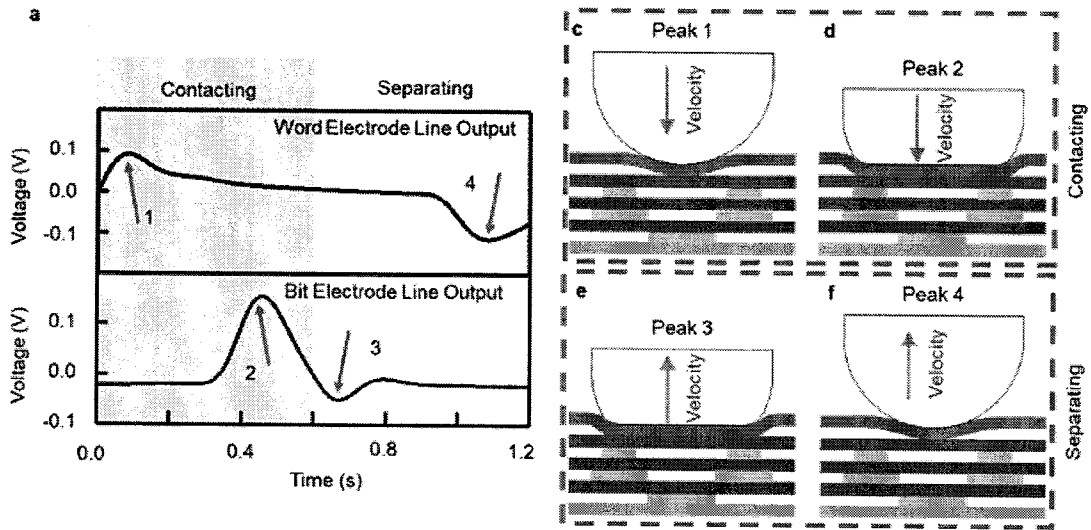


图 6-3 物体接触-分离时，被接触的传感单元的信号输出

Figure 6-3 Signal output of the bit electrode line and word electrode line under the contacted node

传感单元在接触-分离时产生的信号如图 6-3 所示。可以看到，字线电极线和位线电极线输出信号存在不同步的现象，如图 6-3a 所示。产生这种现象的主要是因为马克笔头形变造成马克笔头与传感单元的面积发生变化，从而导致字线电极线和位线电极线上信号输出不同步。

字线电极和位线电极以互补图案式结构设计存在于单个传感单元内，其中字线电极以实心块的形式位于传感单元中心而位线电极以空心方块的形式包裹字线电极。在测试时，接触的物体为马克笔头。由于马克笔头是由弹性海绵制成，且具有半球形状，当马克笔头接触传感单元时马克笔头将会被挤压，当施加在马克笔头上的压力增大时，马克笔头与传感单元之间的接触面积将增大。测试时，马克笔头首先与传感单元中心的字线电极部分接触，因此字线电极线上将输出信号 1，当马克笔头继续受压时，马克笔将接触到传感单元的位线电极区域，因此位线电极线上将输出信号 2。当

马克笔头离开传感单元时，马克笔头与传感单元的位线电极区域将首先分离，因此位线电极线上首先输出信号 3，当马克笔头继续与传感单元分离时，马克笔头将与传感单元的字线电极区域分离，此时字线电极线上将输出信号 4。信号产生原理和过程如图 6-3b~3f 所示。

对于物体与传感单元接触-分离的一个周期进行分析可以看到，在一个周期中，字线电极的信号输出幅值的最大值与最小值之差约为 0.4 V，同样，位线电极的信号输出幅值的最大值与最小值之差也约为 0.4 V。

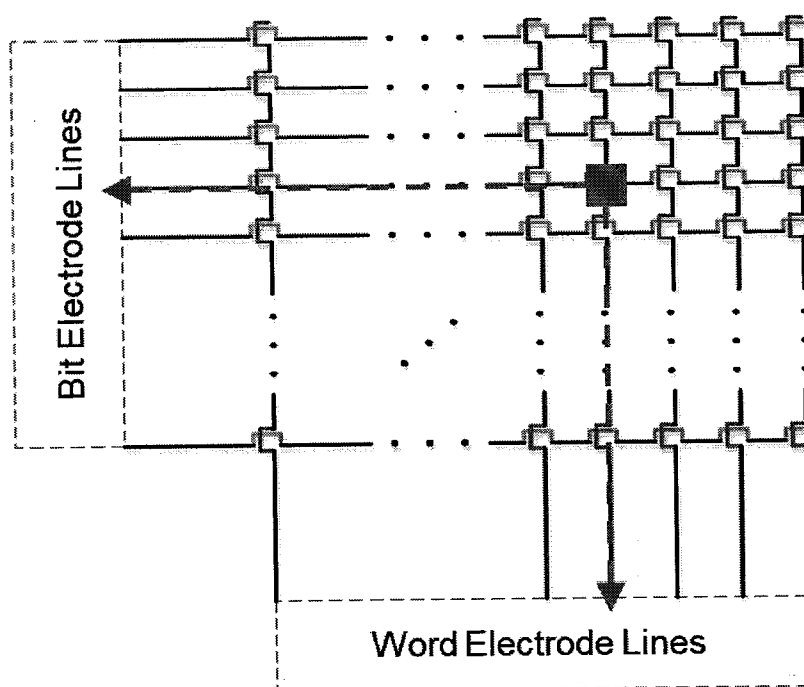


图 6-4 高分辨率自驱动触控传感阵列的工作原理

Figure 6-4 Working principle of the reported sensing matrix

将该检测到的字线信号输出所在的字线信号传输通道和位线信号输出所在的位线信号传输通道带入到传感阵列中，根据笛卡尔坐标系二维定位原理，即可确定接触物体在传感阵列中的位置，如图 6-4 所示。

6.2.4 高分辨率薄膜式自驱动触控传感阵列完整制备工艺

由于激光雕刻无法实现设计分辨率的传感阵列制作工艺要求，我们选择用微纳加工方法制作高分辨率薄膜式自驱动触控传感阵列。由于整个触控传感阵列分为上下两部分，因而在器件制作上也分上下两部分来分别制作。

高分辨率薄膜式自驱动触控传感阵列的上半部分制作在亚克力为基材的方框上。

先用激光雕刻机制作一个外径尺寸为 $6 \times 6 \text{ mm}^2$ ，内径尺寸为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 的方框，随后在方框的一侧表面贴上双面胶带，将 TPU 薄膜绷展贴到双面胶表面。将厚度为 5 mm 的泡沫胶带切成 4 个尺寸为 $5 \times 5 \text{ mm}^2$ 的方柱，并将切好的 4 个方柱粘到亚克力方框的四个角上，形成上层起电层与下层起电层之间的间隙。

高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的除上层起电层以外的部分制作在 PI 薄膜上，以图 6-1b 的顺序从下到上的方式依次层叠。首先，用激光雕刻机切一块直径为 13cm 的圆形 PI 薄膜，随后依次用丙酮，异丙醇，酒精和去离子水对 PI 薄膜超声处理 1min，并在鼓风干燥箱中烘干。为了便于在 PI 薄膜上制作微型图案电极，在 PI 薄

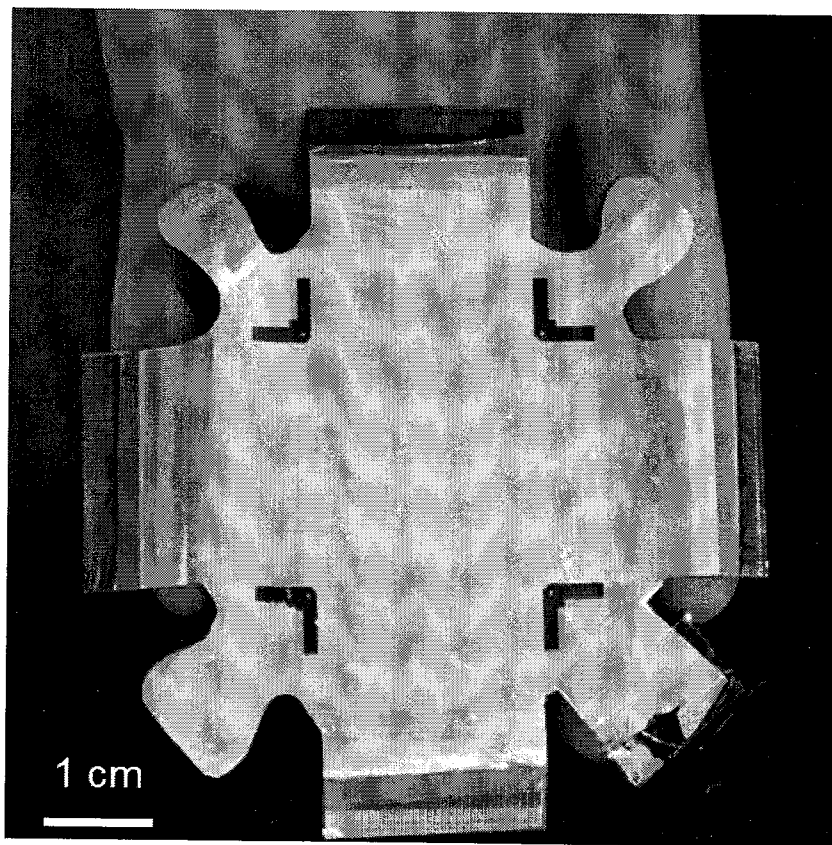


图 6-5 高分辨率自驱动触碰传感阵列器件照片

Figure 6-5 Image of the reported sensing matrix

膜光刻之前先将 PI 薄膜贴到一片直径大于 PI 薄膜尺寸的硅片上，PI 薄膜与硅片之间用光刻胶粘附，这样做的好处是 PI 薄膜易于从硅片上揭下来。随后以 3000 rmp 的转速并持续 60 s 的方式在 PI 薄膜表面形成一层厚度约 $2.5 \mu\text{m}$ 的光刻胶层，前烘完成后，用字线电极层掩模板在前烘好的光刻胶层上刻蚀出字线电极的层团，经过后烘，显影后，PI 薄膜表面的光刻胶层即留下了字线电极图案的凹槽。通过电子束蒸发方式

在凹槽中蒸镀 300 nm 厚的 Ag 作为电极。将剩余的光刻胶去除后,用 CVD 方法在 PI 薄膜和沉积的电极表面形成一层约 3 μm 厚度的 parylene C 下层绝缘层。在下层绝缘层表面利用光刻的方法形成一层带有屏蔽电极层图案凹槽的光刻胶层,并用电子束蒸发的方式在凹槽中沉积 300 nm 的 Ag 作为电极。在去除下层绝缘层表面的剩余光刻胶后,在下层绝缘层和屏蔽电极层表面用 CVD 的方法沉积一层厚度约 3 μm 的 Parylene C 上层绝缘层。在上层绝缘层表面利用光刻的方法形成一层带有位线电极层图案凹槽的光刻胶层,并用电子束蒸发的方式在凹槽中沉积 300 nm 的 Ag 作为电极。利用去胶液去除上层绝缘层表面剩余的光刻胶,随后用 CVD 方法在上层绝缘层和位线电极表面形成一层厚度约 3 μm 的 Parylene C 摩擦层,触碰传感阵列的下半部分即制作完成。如图 6-5 所示,触碰传感阵列下半部分中有效的传感区域为 $3\times 3\text{ mm}^2$,由于 60×60 传感阵列共有 120 条信号传输通道引线,为了便于信号的采集,在设计时我们将 60 条行信号传输通道分为 1~30 和 31~60 两组,从左右两边分别引出。60 条列信号传输通道也分为 1~30 和 31~60 两组,从上下两边分别引出。

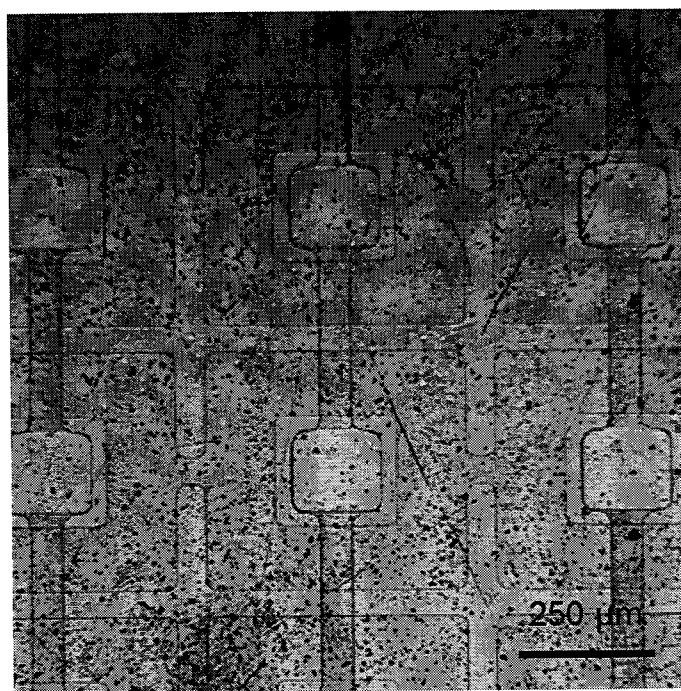


图 6-6 高分辨率自驱动触碰传感阵列光学放大图

Figure 6-6 Enlarged view of the effective sensing area in the reported sensing matrix

图 6-6 为制作好的下半部分高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列中 $3\times 3\text{ mm}^2$ 有效传感区域的部分光学显微镜图片,可以看到,字线电极,屏蔽电极和位线电极很好的对应起来。

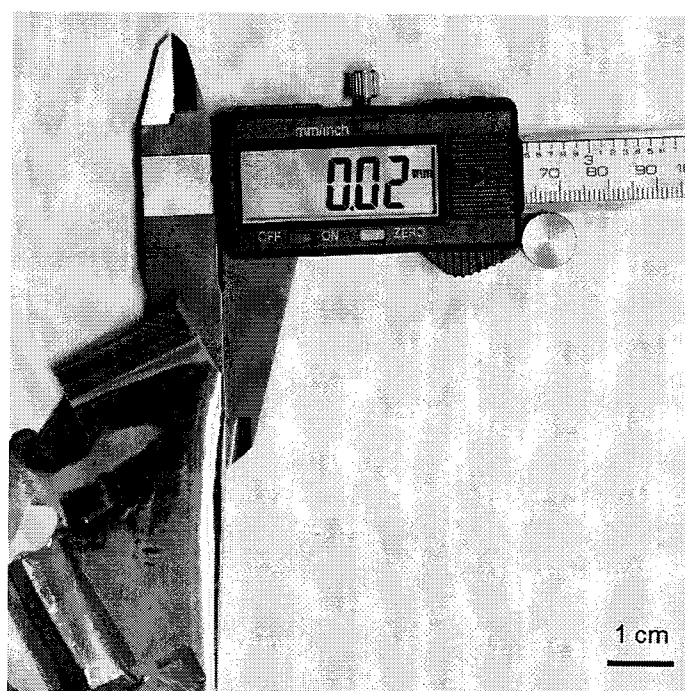


图 6-7 高分辨率自驱动触碰传感阵列厚度

Figure 6-7 Thickness of the reported sensing matrix

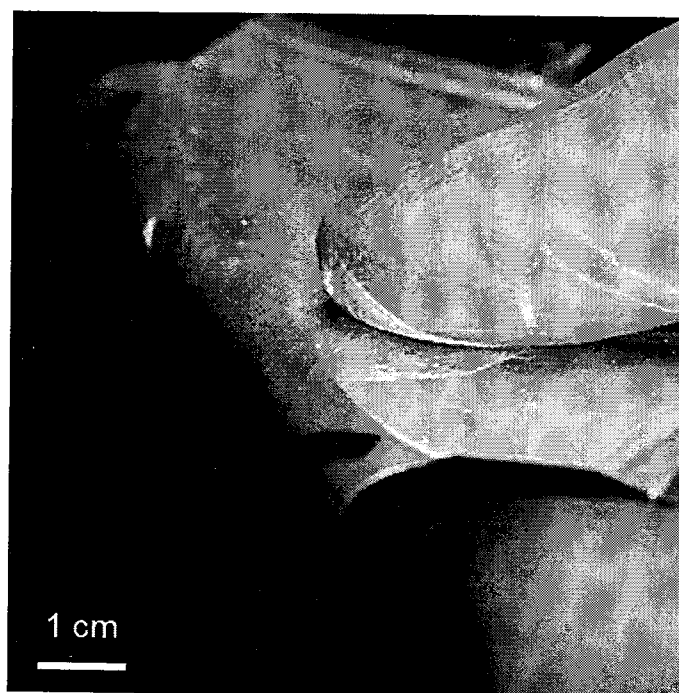


图 6-8 高分辨率自驱动触碰传感阵列柔性展示

Figure 6-9 Demonstration of the flexibility of the reported sensing matrix

由于使用的 PI 薄膜，蒸镀的电极以及制作的 Parylene C 均很薄，制作好的高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的厚度仅 $20\ \mu\text{m}$ ，如图 6-7 所示。超薄的触碰传感阵

列具有非常好的柔性，可以很容易的被弯曲。如图 6-8 所示。

6.3 高分辨率自驱动触碰传感阵列测试结果

在制作好的高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的基础上，我们探讨了高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的工作原理，并在此基础上研究和对比了提高传感阵列输出的方法。最后，结合小信号处理电路，我们测试了传感阵列在实际应用情况下的信号输出。

6.3.1 高分辨率自驱动触碰传感阵列起电层材料性能表征

由高分辨率自驱动触碰传感阵列的工作原理可知，摩擦层材料的起电性能会显著的影响字线电极和位线电极的输出信号幅值。为了提高摩擦层材料的起电性能，提高因接触起电效应在摩擦层表面产生的摩擦电荷密度，我们用两种方法对摩擦层材料进行了表面修饰，分别为 PTFE 纳米颗粒表面修饰方法和电感耦合等离子体(ICP)刻蚀方法。未经修饰的摩擦层材料 SEM 表面微区形貌如图 6-9 所示，

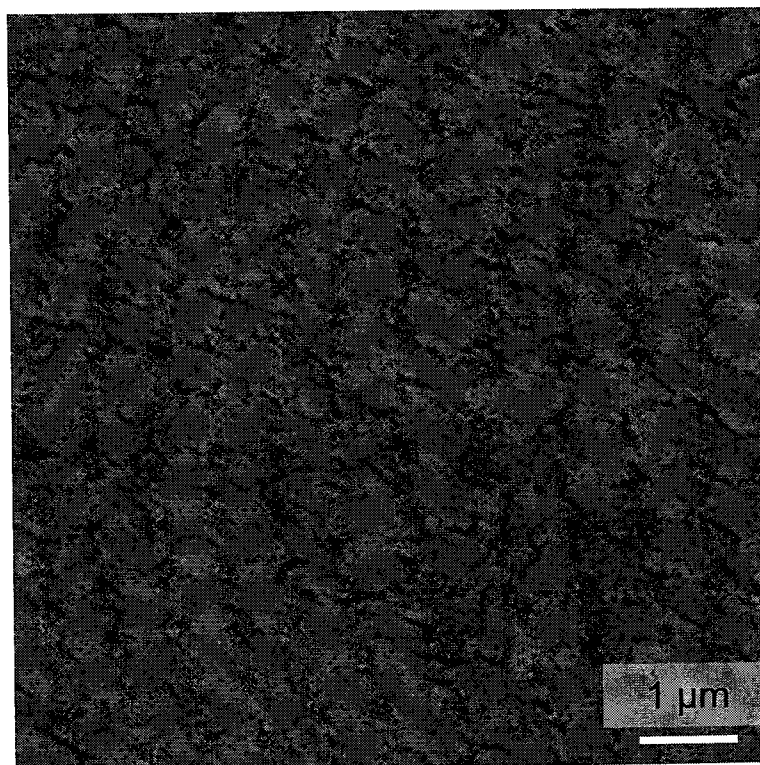


图 6-9 没有任何表面修饰的起电层材料扫描电子显微镜照片

Figure 6-9 SEM image of the surface morphology of the original surface of the electrification material

经过 PTFE 纳米颗粒表面修饰后的摩擦层材料 SEM 表面形貌如图 6-10 所示。

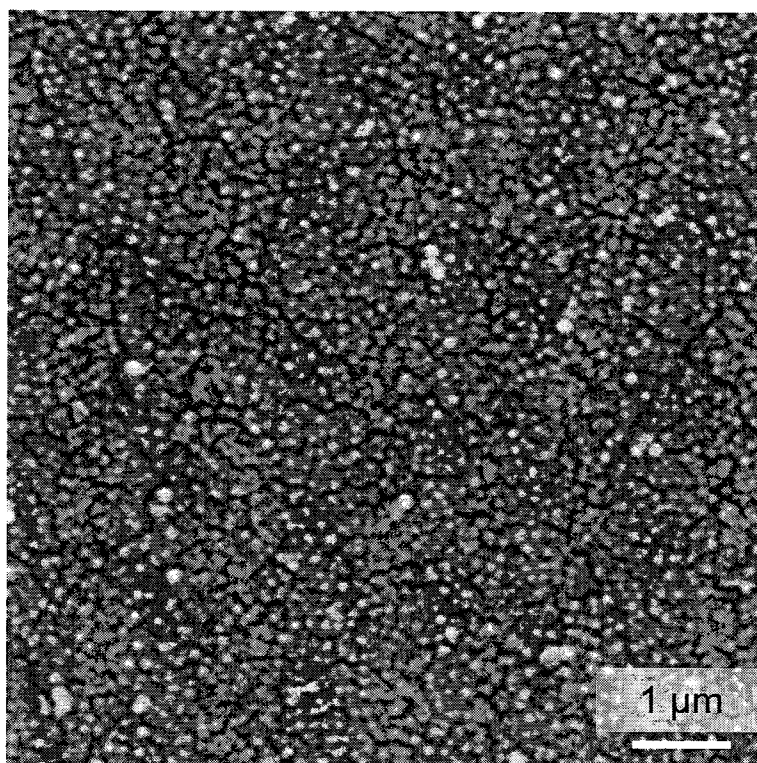


图 6-10 PTFE 纳米颗粒修饰后的起电层材料扫描电子显微镜照片

Figure 6-10 SEM image of the surface morphology modified by PTFE nanoparticle

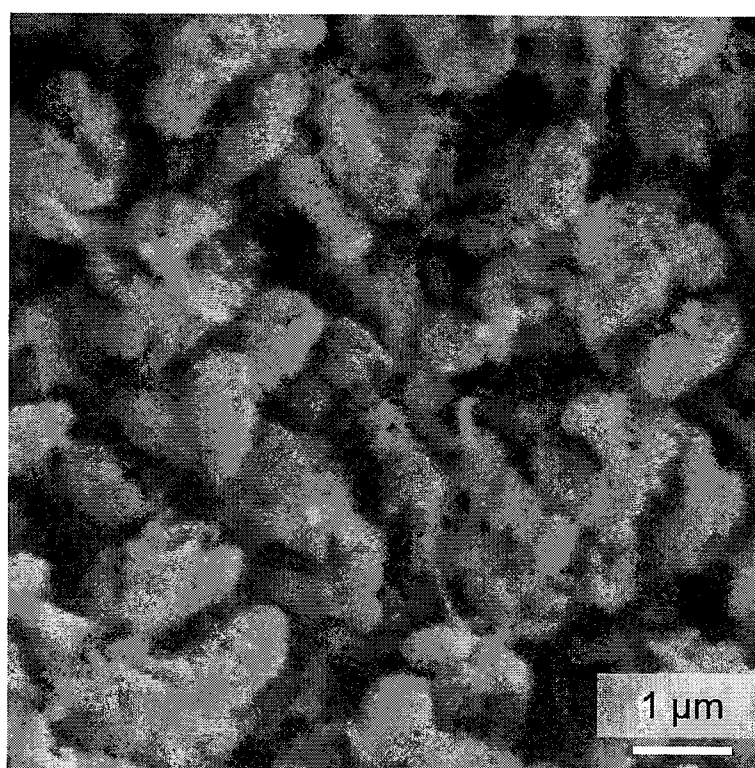


图 6-11 ICP 刻蚀后的起电层材料扫描电子显微镜照片

Figure 6-10 SEM image of the surface morphology etched by ICP

为了更加直观的说明表面修饰带来的变化,我们在同样的测试条件下测量传感单元在摩擦层未经表面修饰情况下(标记为 1),经过 PTFE 纳米颗粒修饰情况下(标记为 2)以及经过 ICP 刻蚀情况下(标记为 3)的信号输出,并对测量得到的信号输出进行归一化处理,以更加直观的表现表面修饰对信号输出的影响。

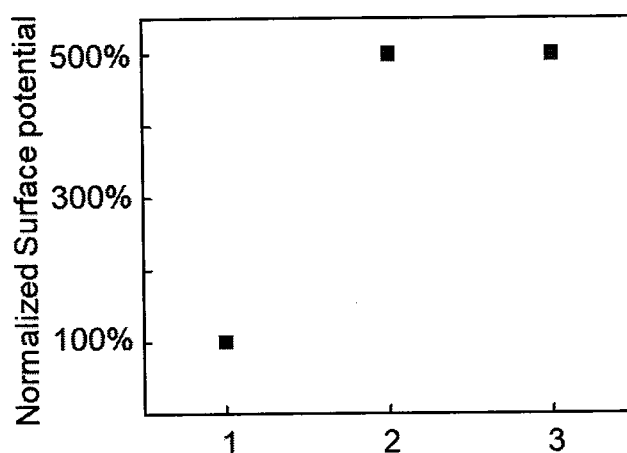


图 6-12 传感单元在未修饰, 纳米颗粒修饰及 ICP 刻蚀情况下测量结果的归一化值

Figure 6-12 Normalized surface potential of the signal output of the sensing node under original, nanoparticle modified and ICP etched state, respectively

这里归一化计算以未经修饰情况下传感单元的信号输出幅值为基值,用修饰后的传感单元的信号输出除以该基值得到的归一化数据为纵坐标,以样品标记号为横坐标作图,如图 6-12 所示。结果显示,经过修饰后的传感单元输出幅值是未经修饰的传感单元输出幅值的 5 倍,显著的高于未经修饰的传感单元的输出。在表面修饰的情况下,用 PTFE 纳米颗粒修饰摩擦层材料得到的信号输出幅值与用 ICP 刻蚀修饰摩擦层材料得到的信号输出幅值相当,说明这两种修饰方法产生的效果差不多。

考虑到 ICP 刻蚀方法是在摩擦层表面刻蚀出一定的微区形貌,相对 PTFE 纳米颗粒修饰而言,ICP 刻蚀表面修饰的方法耐磨性更好,保留的时间更长,因而选择 ICP 刻蚀作为摩擦层材料的表面修饰方法。

6.3.2 高分辨率自驱动触碰传感阵列一致性研究

为了考察并评价高分辨率自驱动触碰传感阵列输出信号的一致性,我们在传感阵列未触碰的状态下测量了传感阵列的 60 条位线信号传输通道和 60 条字线信号传输通道的信号输出。结果如图 6-13 和 6-14 所示。图 6-13a 显示了所有 60 条字线信号传

输通道在高分辨率自驱动触碰传感阵列未接触状态下的信号输出, 参照颜色标尺可知, 60 条字线信号传输通道的信号输出波动幅值均在 3 mV 以下, 基本上在 2 mV, 具有很好的一致性。为了更加清楚的表示采集到的字线信号传输通道的信号输出, 我们选择了 $W_{39} \sim W_{48}$ 这 10 条字线数据加以放大, 以更清楚显示采集到的信号输出的变化。结果如图 6-13b 所示, 在传感阵列未接触状态下, 选择的 10 条字线信号传输通道的最大输出波动幅值为 3 mV, 最小为 1 mV, 同样具有很好的一致性。

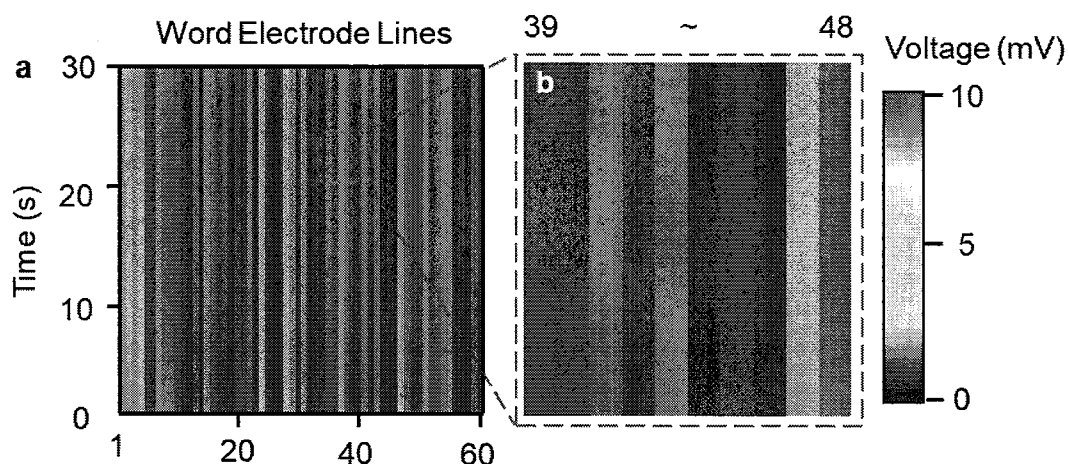


图 6-13 高分辨率自驱动触碰传感阵列输出信号的一致性测试结果

Figure 6-13 Consistency test of the reported sensing matrix

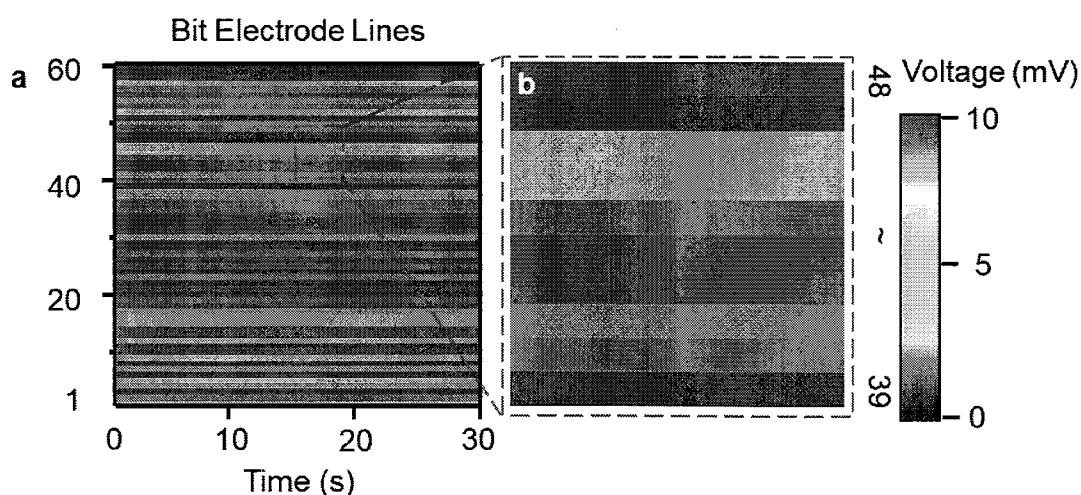


图 6-14 高分辨率自驱动触碰传感阵列输出信号的一致性测试结果

Figure 6-14 Consistency test of the reported sensing matrix

图 6-14a 显示了所有 60 条位线信号传输通道在传感阵列未接触情况下的信号输出, 参照颜色标尺可知, 60 条位线信号传输通道的信号输出波动幅值均在 3 mV 以

下, 最小为 1 mV, 具有非常好的一致性。同样为了更加清晰的表示采集到的位线信号传输通道的信号输出幅值, 我们选择了 $B_{39} \sim B_{48}$ 这 10 条位线信号传输通道的信号输出幅值加以放大, 如图 6-14b 所示, 在传感阵列未接触状态下, 选择的 10 条位线信号传输通道的最大输出波动幅值为 3 mV, 最小为 1 mV, 同样具有很好的一致性。

6.3.3 高分辨率自驱动触碰传感阵列的小信号处理电路

当物体与传感阵列接触-分离时, 接触位置处下方的字线电极和位线电极将会输出电压信号并通过所在的字线信号传输通道和位线信号传输通道向外传输。比如, 当物体按压标记为 (W_{20}, B_{34}) 处的传感单元时, 我们可以在标记为 W_{20} 的字线信号传输通道和标记为 B_{34} 的位线信号传输通道测量到因物体与传感单元接触-分离而产生的电信号。由于高分辨率下传感单元的面积相对较小, 而接触起电效应是面效应, 因而物体与传感单元的接触-分离时产生的信号要远弱于低分辨率下传感阵列的信号输出, 尽管有屏蔽电极层的存在, 大部分的干扰信号被显著的抑制了, 由于环境工频噪声和电磁信号干扰的存在, 干扰信号的幅值仍然较大。

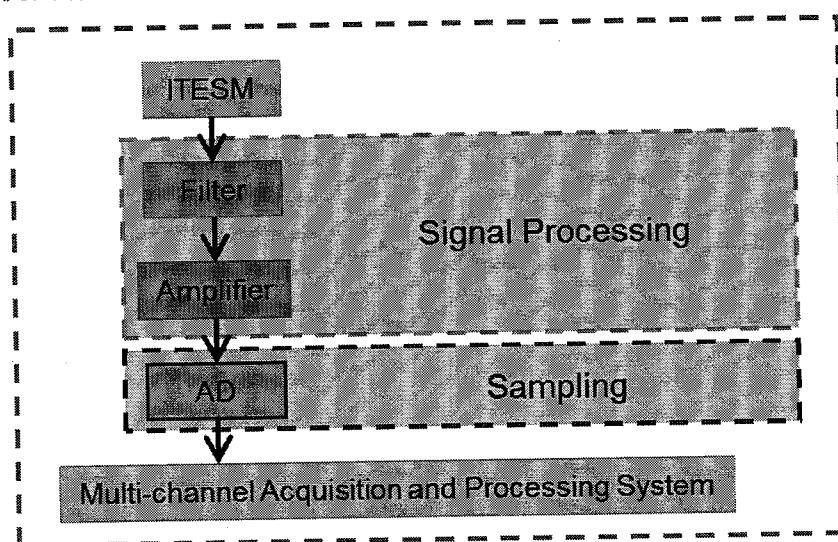


图 6-15 高分辨率自驱动触碰传感阵列的信号测试系统

Figure 6-15 Illustration of the signal measurement

这里我们设计了一种小信号处理电路, 如图 6-15 所示, 专门用于解决这类从干扰信号比较大的信号环境中提取出所采集的小信号。设计的小信号处理电路由信号处理和取样两部分组成。信号处理部分先用滤波的方式去除所采集的信号中的工频、环境等干扰信号, 随后对滤波后的信号进行放大以方便对有效信号的识别, 而采样部分主要是将放大后的信号进行数模转换, 把模拟信号转换为数字信号以方便后续进一步

的信号处理。经过小信号处理电路处理后，原本很微弱嘈杂的传感阵列输出信号将变成非常容易识别且容易与干扰信号区分开来的信号，这极大的降低了高分辨率薄膜式柔性触觉传感阵列的信号处理难度。

6.3.4 高分辨率自驱动触碰传感阵列的输出测试

为了便于清楚的观察传感阵列信号输出情况，我们随机考察了 24 条字线信号传输通道和 24 条位线信号传输通道总计 48 条信号传输通道的信号输出。以经过小信号处理电路处理后的信号输出幅值为 Z 轴，以时间为 X 轴，以字线信号传输通道位置为 Y 轴，即得到了 24 条字线信号输出幅值对比图，如图 6-16 所示。

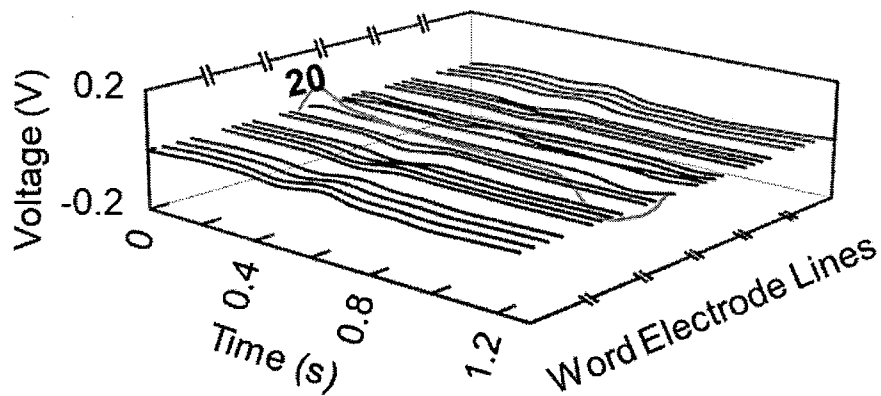


图 6-16 选择的 24 条字线电极在物体接触分离时的信号输出

Figure 6-16 Signal output of the 24 selected word electrode lines when the object contacting and separating

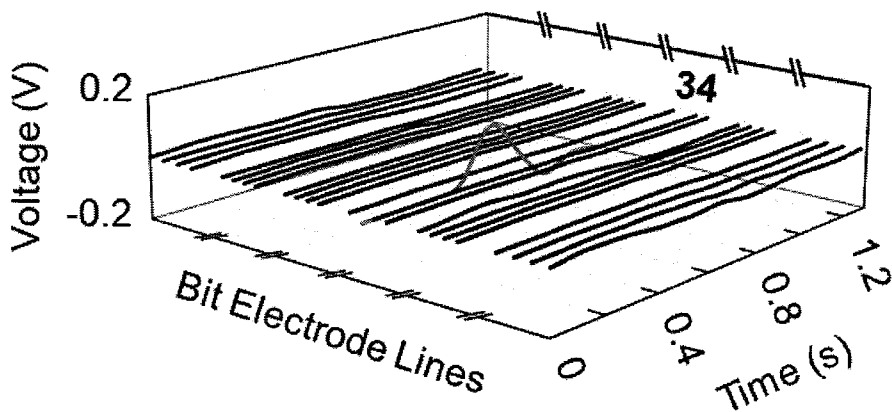


图 6-17 选择的 24 条位线电极在物体接触分离时的信号输出

Figure 6-16 Signal output of the 24 selected bit electrode lines when the object contacting and separating

以经过小信号处理电路处理后的信号输出幅值为 Z 轴，以时间为 Y 轴，以位线信号传输通道位置为 X 轴，即得到了 24 条位线信号输出幅值对比图，如图 6-17 所示。

将图 6-17 中的三维视角转换为二维视角能够更加清楚对比真实信号幅值与干扰信号幅值的对比。图 6-18 对应于图 6-16，为图 6-16 中从红色方框向时间轴方向观察视角的正视图。

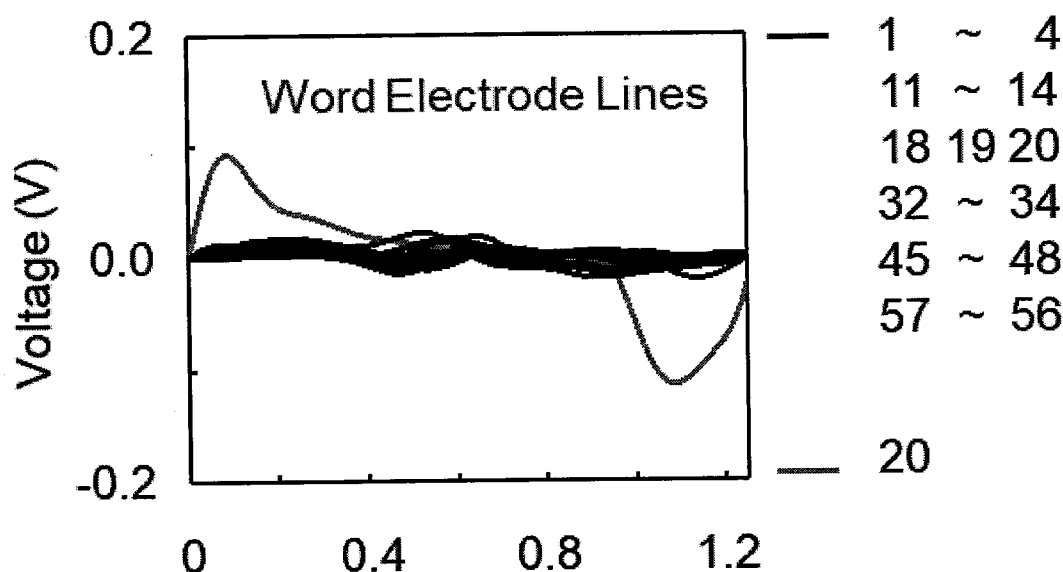


图 6-18 选择的 24 条字线电极在物体接触分离时的信号输出

Figure 6-18 Signal output of the 24 selected word electrode lines when the object contacting and separating

红色表示物体与传感阵列接触位置下方的字线电极所在的信号传输通道测量得到的信号输出，黑色表示选择的 23 条非接触位置下方字线信号传输通道的信号输出，经过小信号处理电路放大后，W₂₀ 的信号输出波形图中波峰与波谷之间的差值约为 0.4 V，而干扰信号的差值最高为 0.02V，相应的 NEXT 值约为 0.05，真实信号能够很显著的与干扰信号区分开来。

图 6-19 对应于图 6-17，为图 6-17 中从红色方框向 Z 轴方向观察视角的侧视图。红色表示物体与传感阵列接触位置下方的字线电极所在的信号传输通道测量得到的信号输出，黑色表示选择的 23 条非接触位置下方字线信号传输通道的信号输出，经过小信号处理电路放大后，B₃₄ 的信号输出波形图中波峰与波谷之间的差值约为 0.4 V，而干扰信号的差值最高为 0.02V，相应的 NEXT 值约为 0.05，真实信号能够很容

易的与干扰信号区分开来。

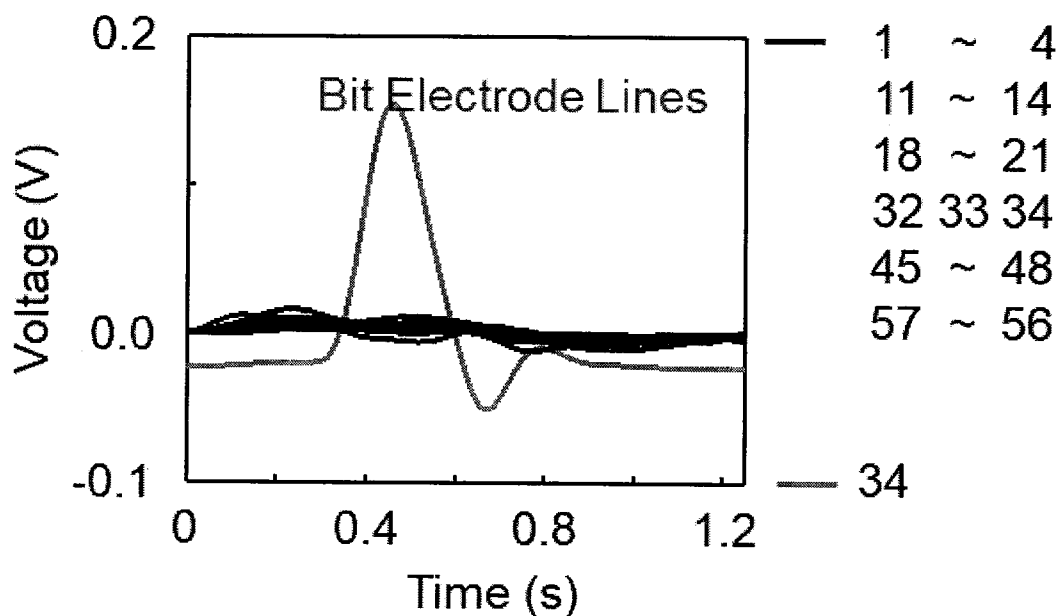


图 6-19

图 6-19 选择的 24 条位线电极在物体接触分离时的信号输出

Figure 6-19 Signal output of the 24 selected bit electrode lines when the object contacting and separating

6.3.5 高分辨率自驱动触碰传感阵列的稳定性研究

为了考察并评价高分辨率自驱动触碰传感阵列信号输出的稳定性,我们用物体以 1 Hz 的频率与传感阵列中位于(W₂₀, B₃₄)处的传感单元接触-分离,测量传感阵列在该测试条件下的信号输出。

为了便于表述传感器件的信号输出,这里同样随机选择并测量了 60 条字线信号传输通道中的 24 条字线信号传输通道和 60 条位线信号传输通道中的 24 条位线信号传输通道,并将测量得到的结果做图。

图 6-20 为测量得到的经过小信号处理电路处理后的 24 条字线信号传输通道的信号输出。可以看到的是,在 1 Hz 测试条件下,位于接触位置下方的 W₂₀ 信号传输幅值相当稳定,显示的 10 个周期的信号输出幅值稳定在约 0.4 V。此外,传感阵列的干扰信号输出幅值几乎没有明显的变化,稳定在 0.02 V 以下。

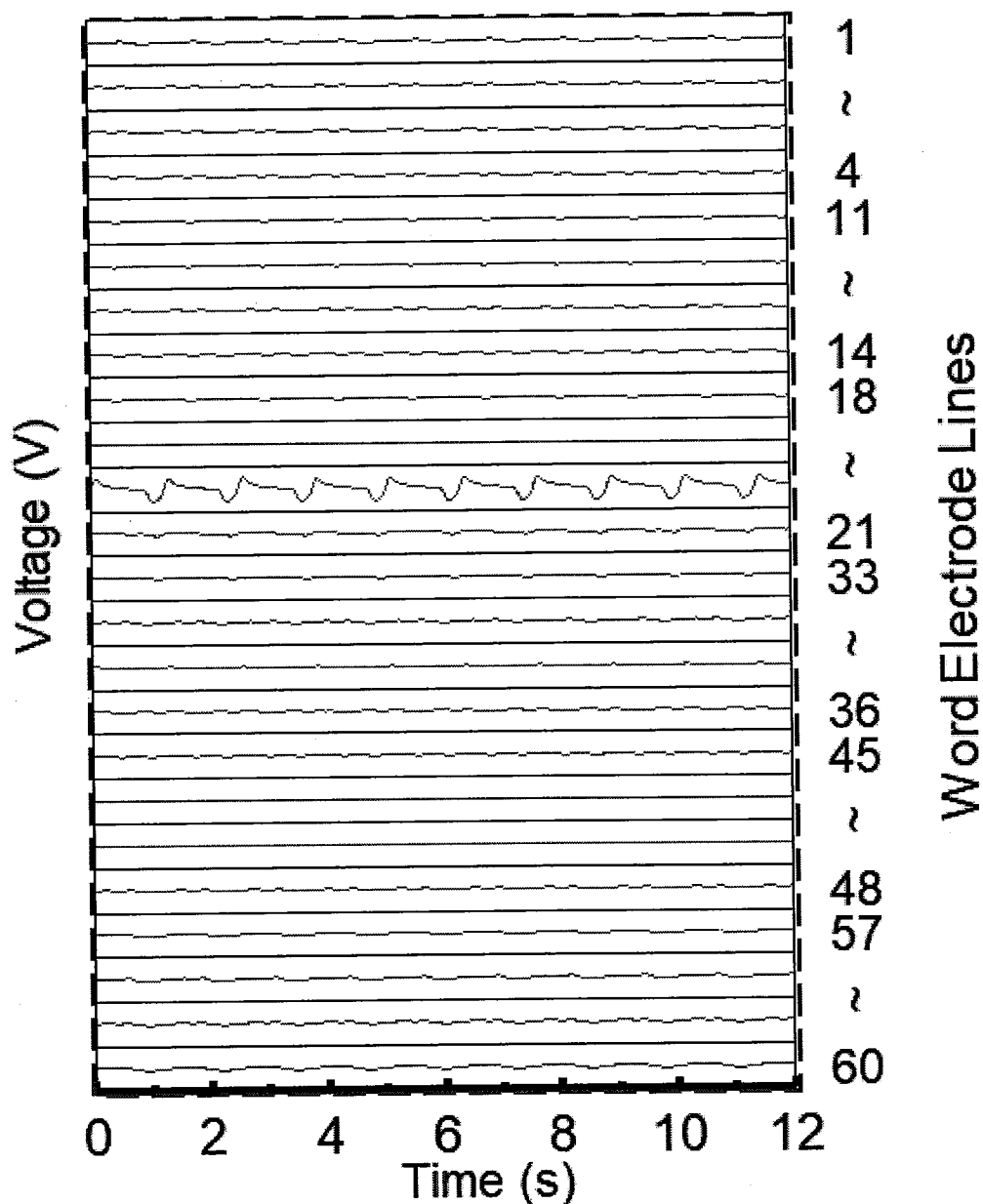


图 6-20 高分辨率自驱动触碰传感阵列信号输出的稳定性测试

Figure 6-20 Stability test of the reported sensing matrix

图 6-21 为测量得到的经过小信号处理电路处理后的 24 条位线信号传输通道的信号输出。在 1 Hz 测试条件下，位于接触位置下方的 B₃₄ 信号传输幅值同样相当稳定，显示的 10 个周期的信号输出幅值也稳定在约 0.4 V，传感阵列的干扰信号输出幅值稳定在 0.02 V 以下，几乎没有明显的变化。测量结果分析显示，制作的高分辨率自驱动触碰传感阵列信号输出具有非常好的稳定性。同时，传感阵列的干扰信号受到了明显的抑制，这归功于屏蔽层电极的设计。

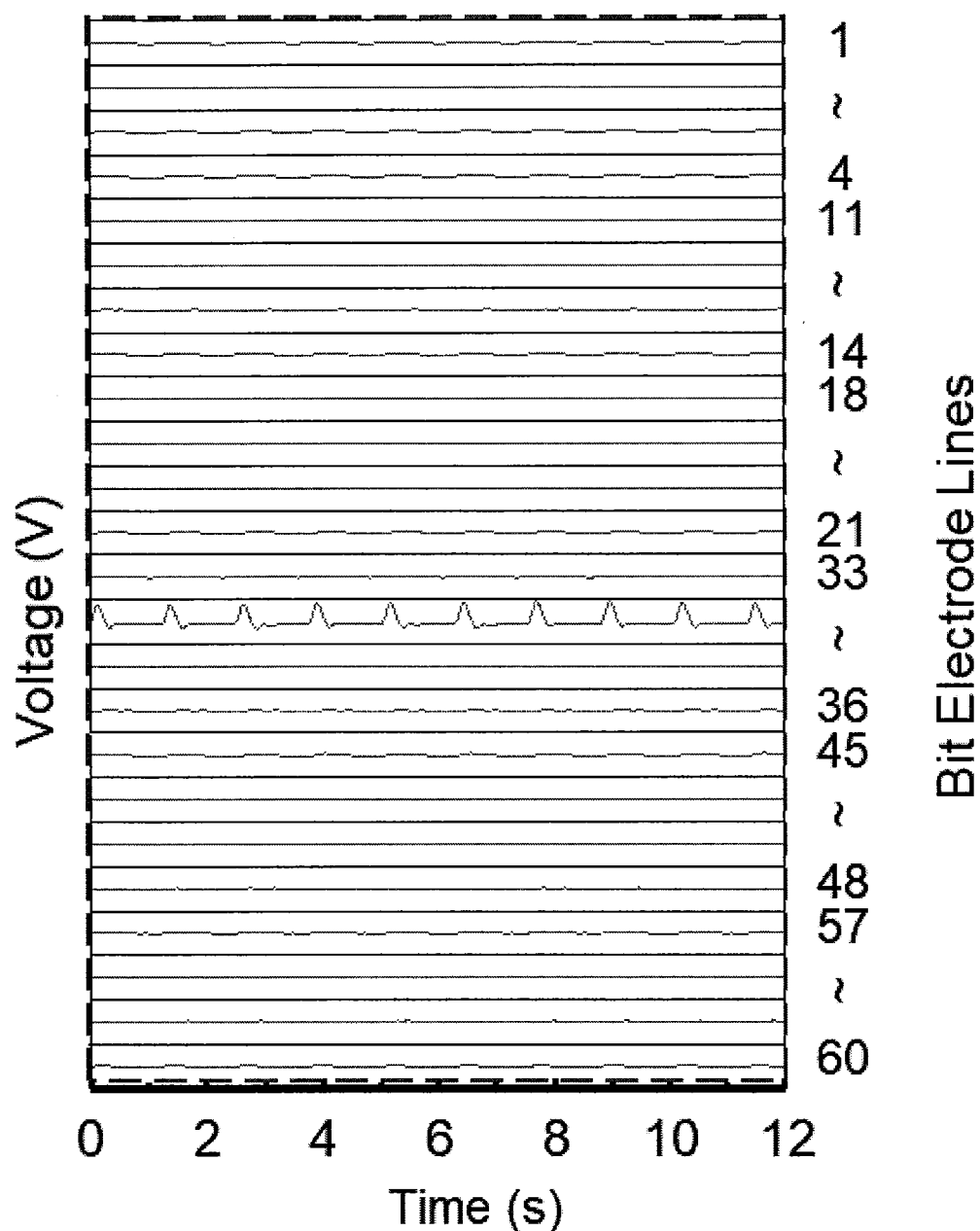


图 6-21 高分辨率自驱动触碰传感阵列信号输出的稳定性测试

Figure 6-21 Stability test of the reported sensing matrix

6.4 本章小结

本章利用微纳加工工艺制作了单元尺寸为 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 的阵列为 60×60 的高分辨率自驱动触碰传感阵列，并针对传感阵列的信号采集设计了一种小信号处理电路。在小信号处理电路的基础上，我们测量了传感阵列的信号输出，还考察了制作的传感阵列的一致性和稳定性。得出的结论有：

(1) 结合微纳加工工艺制作方法, 我们设计了层叠式高分辨率自驱动触碰传感阵列的制作方法, 制作的传感阵列分辨率达到了 50 dpi, 是目前报道的基于接触起电和静电耦合效应的传感阵列最高分辨率的 25 倍。制作的传感阵列 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 有效传感区域中包含了 3600 个传感单元, 传感单元密度达到了 $400 \frac{\uparrow}{\text{cm}^2}$ 。制作完成的传感阵列厚度仅有 $20 \mu\text{m}$, 具有非常好的柔性。此外, 还利用了 ICP 刻蚀方法对摩擦层表面进行修饰, 并且修饰后传感单元的信号输出提高了 5 倍。

(2) 设计的小信号处理电路能够有效的处理高分辨率自驱动触碰传感阵列的输出信号, 并将采集到的传感阵列输出信号进行滤波放大并进行数模转换, 从而使得传感阵列的输出信号更加容易被识别。

(3) 制作的高分辨率自驱动触碰传感阵列在受到物体按压时, 传感阵列的输出信号中真实信号的输出幅值与干扰信号的输出幅值之比达到了 20:1, NEXT 值低至 0.05, 在高分辨率下, 基于接触起电和静电感应耦合原理的自驱动触碰传感阵列的干扰信号仍然被有效的抑制, 这归功于相互嵌套式结构的传感单元中引入了屏蔽电极层。

第七章 基于接触起电效应的柔性传感阵列应用研究

7.1 前言

本章结合信号采集电路,对基于接触起电效应的柔性传感阵列在应用方面展开研究,展示柔性传感阵列在室内定位,电子签名,高分辨率图像采集等人机交互,安防监控,智能家居和健康监护等领域的应用前景。

自 2012 年基于接触起电和静电感应耦合的摩擦纳米发电机首次报道以来,将摩擦纳米发电机应用于触觉传感吸引了大量研究者目光,在过去的几年里,各种结构的基于接触起电和静电耦合的柔性传感单元和阵列先后被报道出来。然而,关于基于接触起电和静电耦合的柔性传感单元和阵列的研究仅关注于单元和阵列本身,对于传感单元和阵列的信号处理严重依赖设备。在传感单元和阵列输出信号的处理方面,这些研究报道都是将传感单元和阵列的信号直接接入测量设备,而不是采用信号处理电路进行传感单元和阵列的信号处理,依赖测量设备的信号处理方式大大的限制了传感单元和阵列的应用场景,因为测量的设备通常都是体积较大,质量较沉,价格高昂,很难做到随应用场景的变化而灵活变化。此外这些测量设备的主要功能是数据测量,对于幅值较低的小信号而言很难有所作为,无法将这些小信号从采集到的嘈杂的环境噪声中识别并提取出来。而信号处理电路对单元和阵列进行信号处理的方法能够根据传感单元和阵列的信号进行定制化的信号处理,无论传感单元和阵列的信号输出幅值高低,信号处理电路不仅能采集信号,同时也能通过一系列的放大、滤波等操作从采集到的嘈杂的环境噪声中提取出有效信号。此外,信号处理电路还可以根据需要定制电路形状,制作完成的信号处理电路可以做到非常轻,能够根据应用场景的要求变化而灵活变化,具有非常好的便携性。而且信号处理电路成本较测量设备而言要低的多,有非常高的成本优势。基于此,我们采用信号处理电路配合以相应的硬件对基于接触起电效应的柔性传感阵列进行信号处理和应用展示。

在本章中,我们制作了不同单元尺寸的柔性传感阵列,同时设计了用于识别柔性传感阵列输出信号的信号处理电路,并展示了柔性传感阵列在单点位置识别,接触物体轨迹追踪以及接触物体形貌采集等方面的应用,展示了基于接触起电效应的柔性传感阵列在人机交互,安防,智能家居,以及健康监护等领域的应用前景。

7.2 自驱动柔性触觉传感阵列应用于室内定位

7.2.1 自驱动柔性触觉传感阵列信号处理电路

在单个传感单元尺寸为 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 的 8×8 大面积传感阵列结构和信号输出研究的基础上，我们设计了信号处理电路和用于展示的 LED 显示面板，展开了基于该大面积传感阵列的应用研究。图 7-11 为设计的信号处理电路工作原理图，由传感阵列(I)，信号处理电路(II)和 LED 显示面板(III)组成。当有物体接触传感阵列中的传感单元时，位于接触位置下方的行电极所在的行信号传输通道和列电极所在的列信号传输通道将会输出信号，并与信号处理电路中的比较器与设定的阈值电压比较，当满足高于设定的阈值电压的条件后，微处理器发出指令，点亮 LED 显示面板上相应位置的 LED 灯，从而实现对接触物体位置的定位。

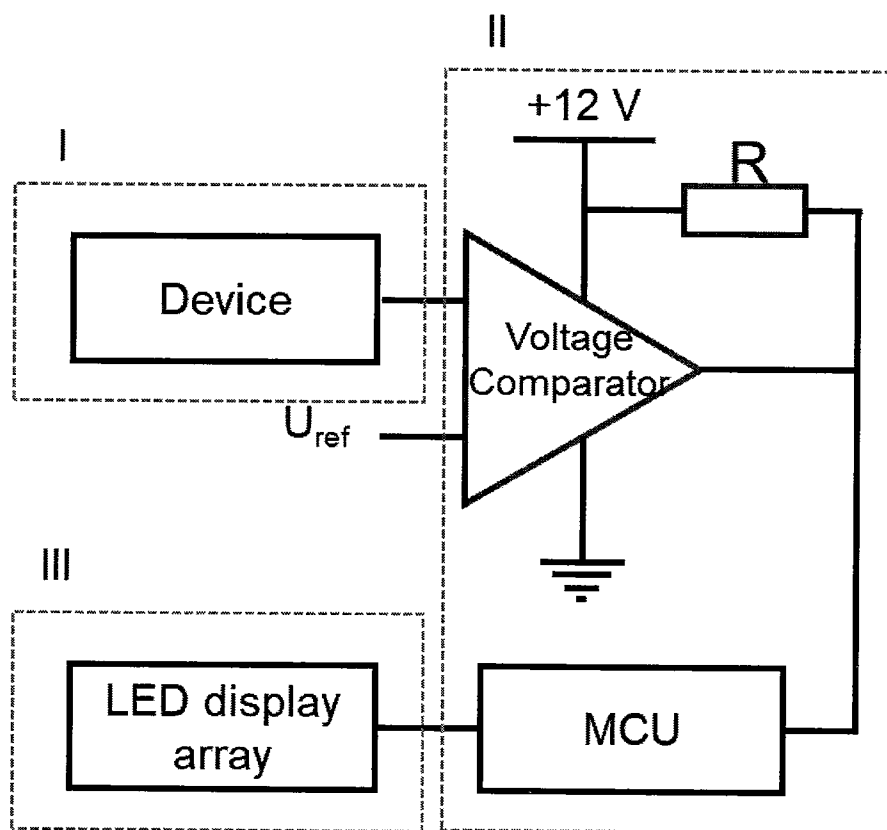


图 7-1 大面积自驱动柔性触觉传感阵列信号处理电路

Figure 7-1 Electric circuit diagrams of the sensing system

7.2.2 自驱动柔性触觉传感阵列应用展示

图 7-2 为 LED 显示面板，由 8×8 共计 64 个 LED 灯组成，并且与大面积自驱动柔性触觉传感阵列中的位置一一对应。当物体接触传感阵列中的某个传感单元时，

LED 显示面板中对应位置的 LED 灯将会被点亮，从而显示物体的位置。

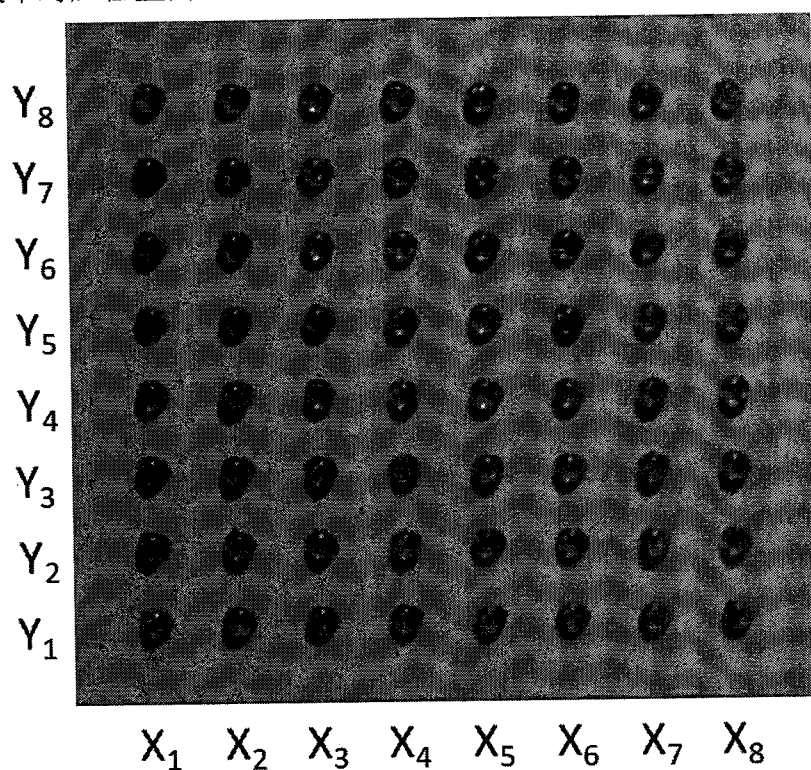


图 7-2 LED 显示面板

Figure 7-2 LED display pannel

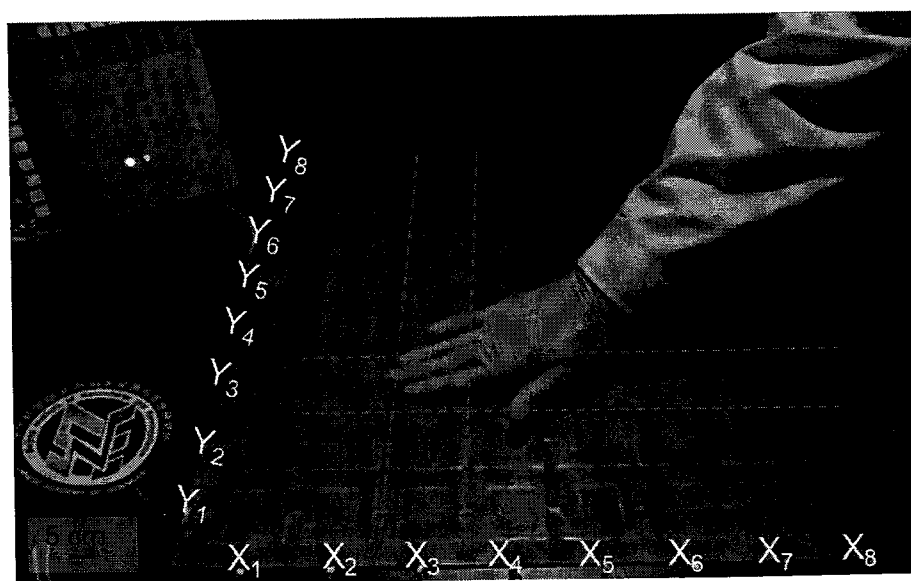


图 7-3 大面积自驱动柔性触觉传感阵列位置定位展示

Figure 7-3 Position locating demonstration of the large-scale self-powered sensing array

大面积自驱动柔性触觉传感阵列应用于单点位置识别的实际展示如图 7-3 所示，当物体按压位于(X₃, Y₃)位置处的传感单元时，LED 显示面板上标记为(X₃, Y₃)位置处

的 LED 即被点亮。

大面积自驱动柔性触觉传感阵列应用于多点识别的实际展示如图 7-4 所示, 可以看到, 当手接触 (X_2, Y_6) 和 (X_7, Y_3) 两个位置处的传感单元时, LED 显示面板相应位置处的 LED 灯即被点亮, 这展示大面积自驱动柔性触觉传感阵列在多点触控方面的应用前景。

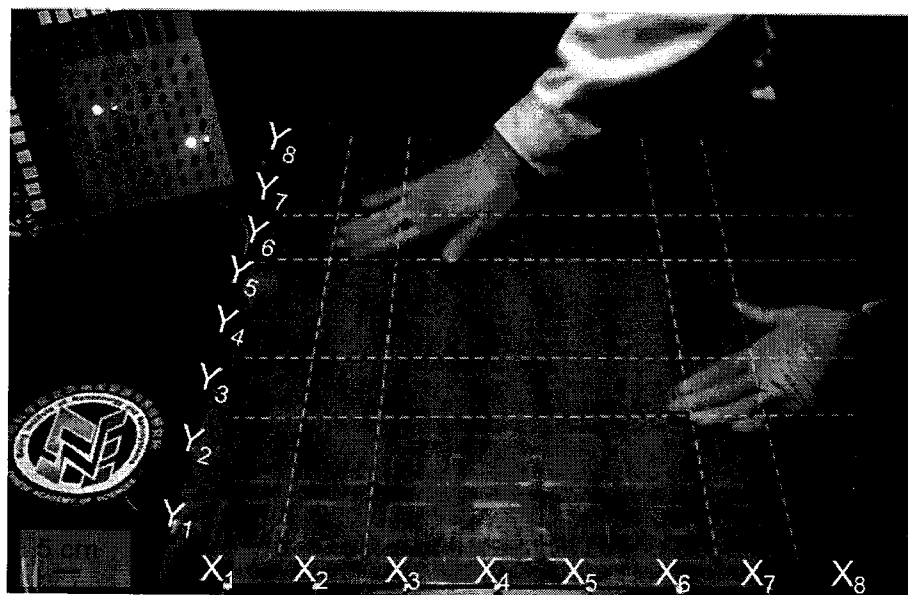


图 7-4 大面积自驱动柔性触觉传感阵列多点定位展示

Figure 7-4 Multi-points recognition of the large-scale self-powered sensing array

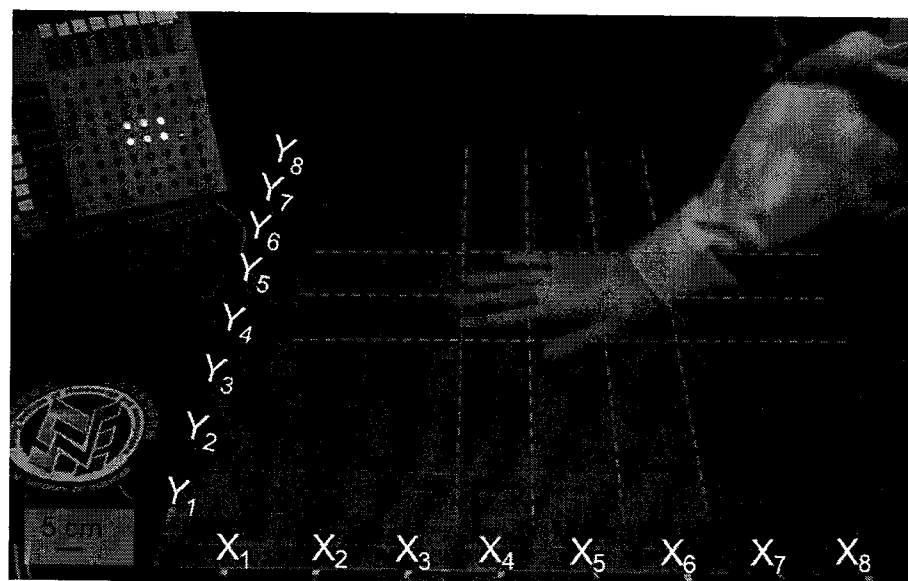


图 7-5 大面积自驱动柔性触觉传感阵列图像采集

Figure 7-5 Image acquisition of the large-scale self-powered sensing array

大面积自驱动柔性触觉传感阵列应用于物体形貌和位置识别的实际展示如图 7-5

和 7-6 所示,

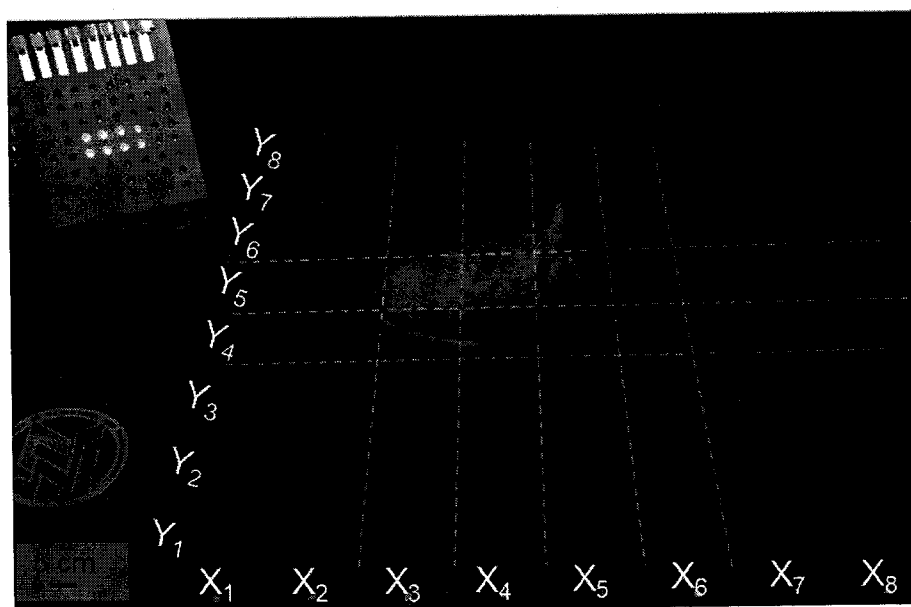


图 7-6 大面积自驱动柔性触觉传感阵列图像采集

Figure 7-6 Image acquisition of the large-scale self-powered sensing array

可以看到,无论是用手还是用脚接触传感阵列,LED 显示面板上不仅准确的显示手和脚在传感阵列中的位置,同时也显示了接触的手和脚的形状。由于大面积自驱动柔性触觉传感阵列单元尺寸较大,因而传感阵列分辨率较低,导致显示的形状只是大致形状。

7.3 自驱动柔性触觉传感阵列应用于电子签名和轨迹追踪

为了满足分辨率较高的应用场景需求,我们进一步提高传感阵列的分辨率,传感单元尺寸从 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 缩小至 $1 \times 1 \text{ cm}^2$,制作了 16×16 的自驱动柔性触觉传感阵列,并设计用于该分辨率下传感阵列的信号处理电路,最后展示了该传感阵列在电子签名,轨迹追踪等人机交互场景下的应用。

7.3.1 自驱动柔性触觉传感阵列信号处理电路

设计的信号处理电路的原理图如图 7-7 所示,该信号处理电路主要由两个功率放大器组成,分别标记为放大器 1 和放大器 2。当信号处理电路采集到传感阵列的输出信号时,首先先通过电阻-电容组成的滤波电路滤掉信号的工频等干扰信号,随后信号经过放大器 1 进行放大,放大后的信号再用电容-电阻组成的滤波电路再次滤掉放大后的干扰信号,二次滤波后的放大信号再通过放大器 2 放大,最终向外输出。输出

后的信号通过电脑端的上位机进行处理，最后将处理后的结果显示在显示屏上。

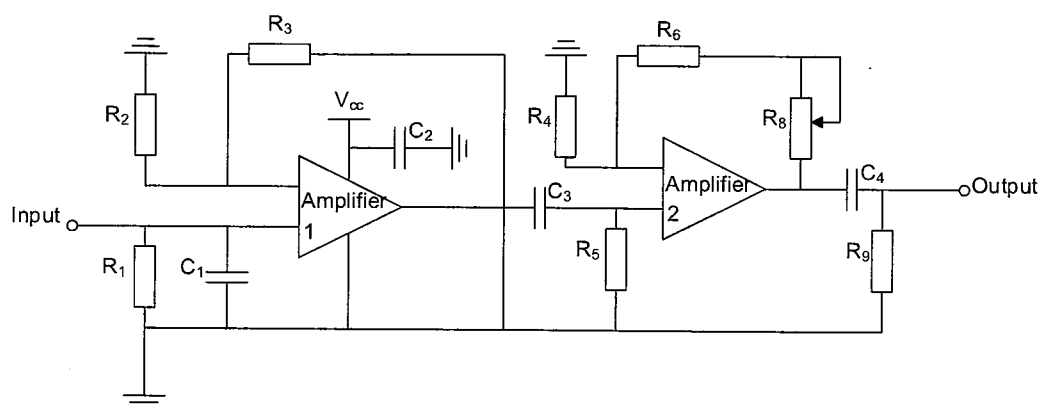


图 7-7 自驱动柔性触觉传感阵列的信号处理电路

Figure 7-7 Electric circuit diagrams of the self-powered flexible tactile sensor array

7.3.2 自驱动柔性触觉传感阵列应用展示

传感阵列在电子签名，轨迹追踪等场景下的实际应用展示如图 7-8 和 7-9 所示。

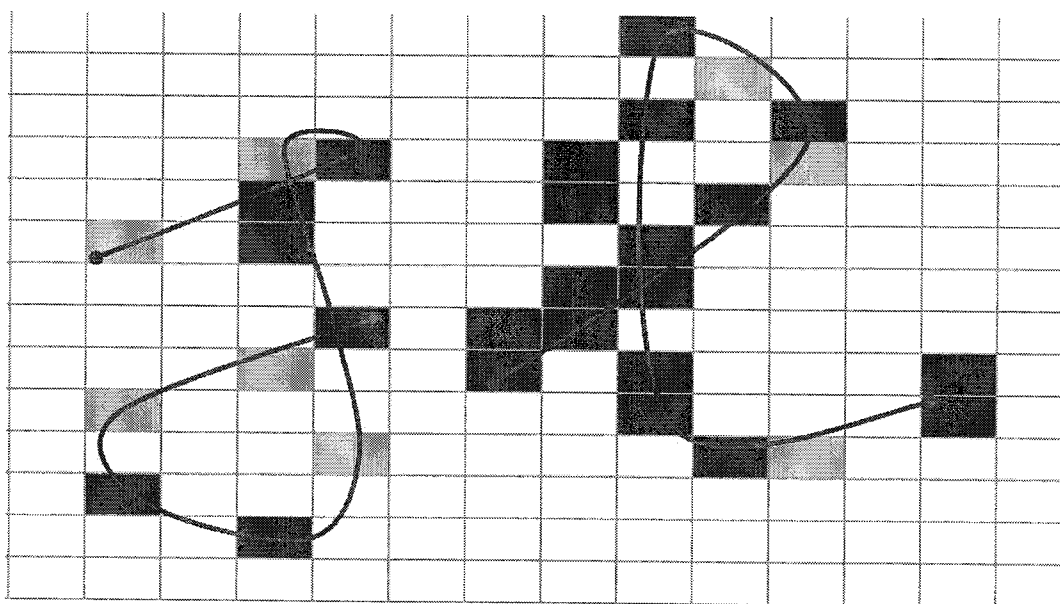


图 7-8 传感阵列用于电子签名

Figure 7-8 Electronic signature demonstration of the self-powered flexible tactile sensor array

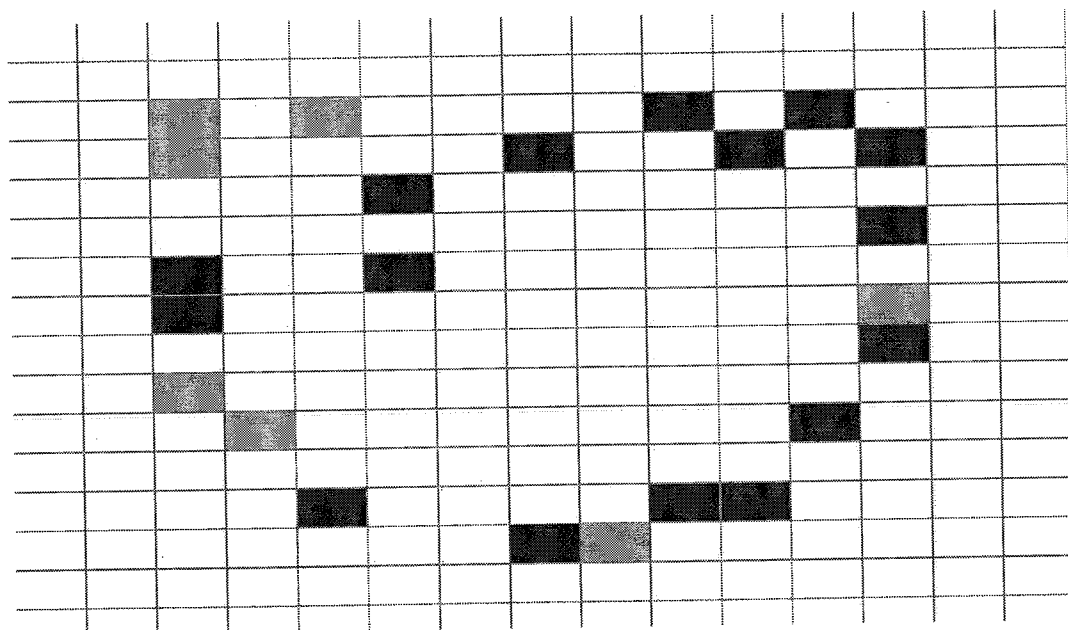


图 7-9 传感阵列用于轨迹追踪

Figure 7-9 Trajectory tracking demonstration of the self-powered flexible tactile sensor array

为了便于观察和处理经电路处理后的信号,我们将信号处理电路处理后的信号再经数模转换芯片处理,结合上位机显示软件,最终显示在显示屏上。图 7-8 展示了用手指在传感阵列上书写汉字“北”时,显示屏上同步的显示图案,这里用红色标记线标记书写汉字的轨迹,可以看到,书写的汉字较为清楚且易于识别,在书写的过程中基本上没有干扰信号的出现。图 7-9 显示了用双指同时在传感阵列上画出心形图案时显示屏上的显示图案。显示的心形边缘较为清晰,形状可识别。

7.4 自驱动触碰传感阵列应用于高分辨率图像采集

为了满足高分辨图案采集和指纹识别等高分辨率应用场景下的需求,我们设计并制作了高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列。针对高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的小信号输出问题,我们设计了一种小信号处理电路(图 6-15),用于对高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的输出小信号进行放大滤波处理,将淹没于环境噪声中的小信号提取并放大,同时滤去工频等干扰信号。在高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列信号测量时,我们搭建了一套信号测试平台,信号测试将高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列中的每个信号通道通过转接的方式变成一根根杜邦线插头,便于后续信号采集。在信号测量时,为了保持每次测试的一致性,我们将用于测试的接触物体固定

到线性马达上，如图 7-10 所示。

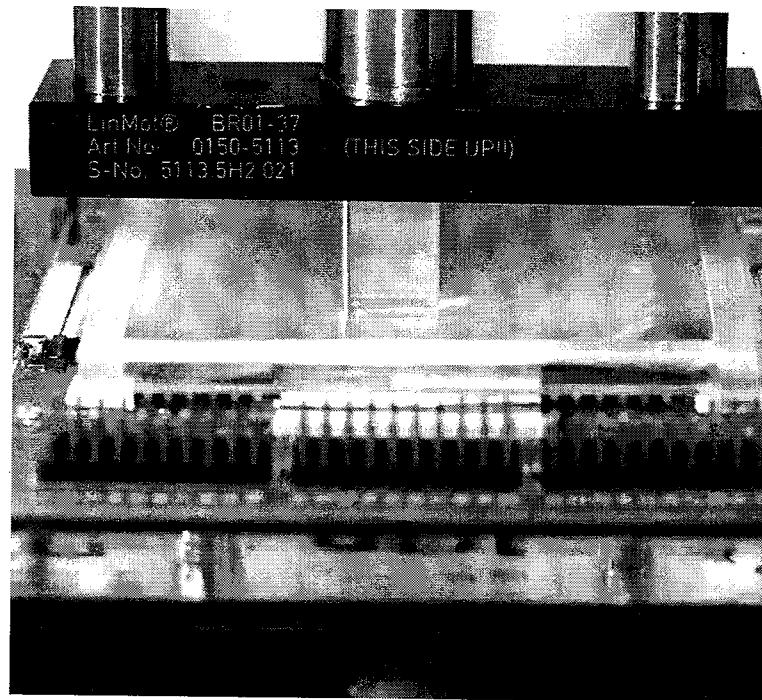


图 7-10 高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列测试平台

Figure 7-10 Testing platform of the high resolution, thin-film, self-powered touch sensor array

接触物体的局部放大图如图 7-11 所示，在测量时，物体先与 TPU 薄膜接触，随

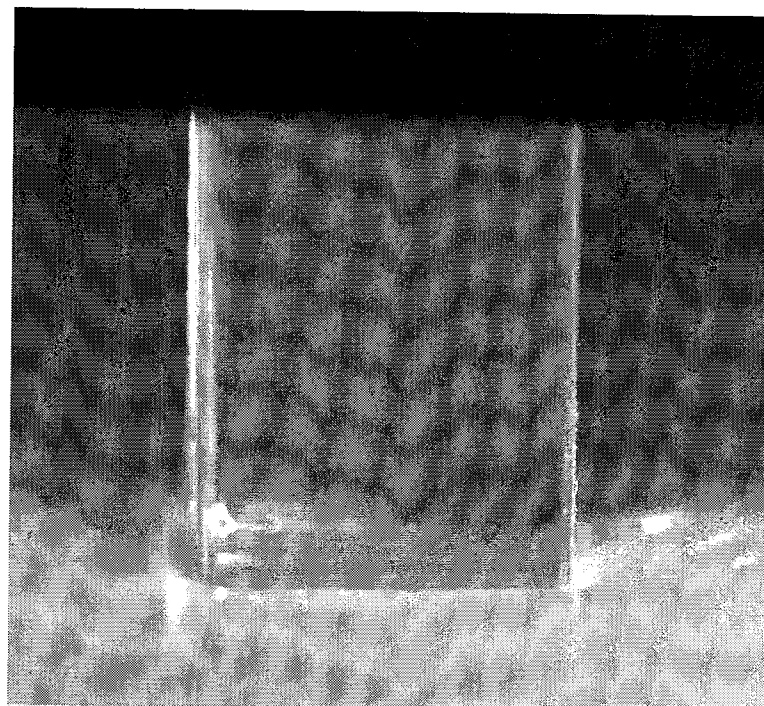


图 7-11 接触物体的局部放大图

Figure 7-11 Enlarged view of the contacting object

后再与传感阵列接触。通过高分辨率薄膜式自驱动触碰传感阵列的上下部分结构设置,物体与传感阵列的接触最终转换成 TPU 薄膜与传感阵列直接的接触。

采集到的经过信号处理电路放大滤波后的峰值数据如图 7-12 和 7-13 所示。

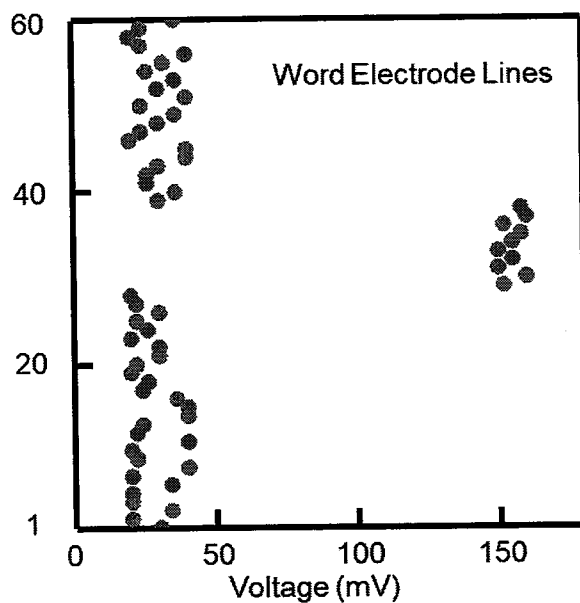


图 7-12 采集到的经信号处理电路处理后的字线电极峰值输出信号

Figure 7-12 Peak signal output of the word electrode lines processed by signal processing circuit

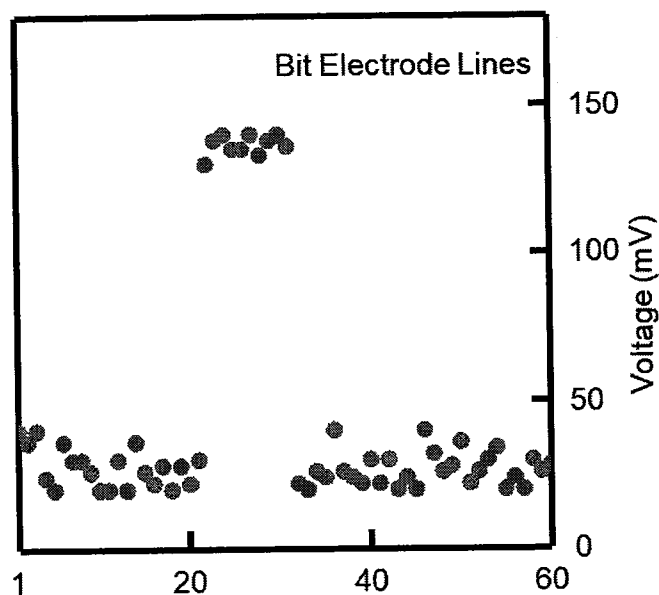


图 7-13 采集到的经信号处理电路处理后的位线电极峰值输出信号

Figure 7-13 Peak signal output of the bit electrode lines processed by signal processing circuit

图 7-12 为所有字线信号传输通道的峰值信号输出，可以看到，经过信号处理电路放大滤波处理后，位于接触物体下方的字线信号传输通道的峰值输出约为 150 mV，位于非接触物体下方的字线信号传输通道的峰值输出约为 40 mV，真实信号输出能够显著的与干扰信号区分开来。图 7-13 为所有位线信号传输通道的信号输出。经过信号处理电路放大滤波处理后，位于接触物体下方的位线信号传输通道的峰值输出约为 150 mV，位于非接触物体下方的位线信号传输通道的峰值输出约为 40 mV，真实信号输出同样能够显著的与干扰信号区分开来。

利用软件将图 7-12 和 7-13 中采集到的字线峰值输出信号和位线峰值输出信号综合判断，最终还原出了按压物体的位置，同时，对于接触物体的形貌也一并还原。

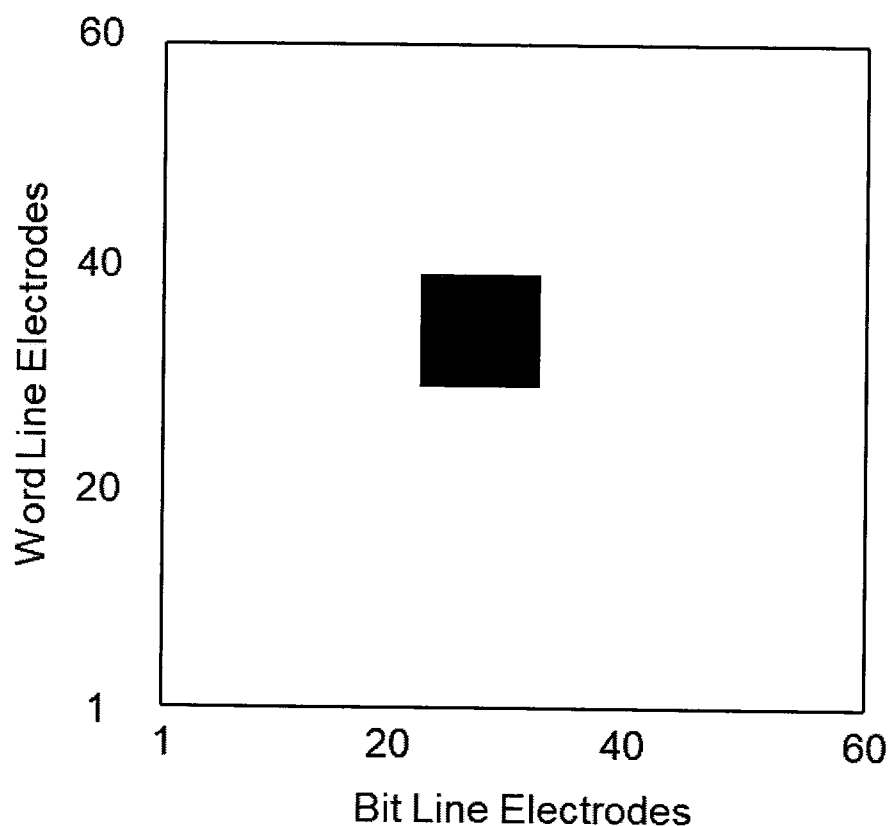


图 7-14 接触物体的形状及其在传感阵列中的位置

Figure 7-14 The remapped results of the shape and position of the contact object

7.5 本章小结

本章针对基于接触起电效应的柔性传感阵列设计了信号处理电路,并展示传感阵列的实际应用。得出的结论有:

(1) 利用信号处理电路而不是测量设备对传感阵列进行信号采集处理有非常大的优势。测量设备的主要功能是信号采集,通常不具备信号滤波、放大等信号处理功能,而信号处理电路能够根据应用的实际需求灵活的做出改变,可以对信号进行一系列的复杂的诸如滤波、放大等处理操作。此外,相对于测量设备而言,信号处理电路具有非常明显的成本优势。

(2) 基于接触起电效应的柔性传感阵列的应用研究展示了基于接触起电效应的柔性传感阵列在人机交互,安防,智能家居以及健康监护等方面广泛的应用前景。

第八章 全文总结与展望

8.1 工作总结

本论文围绕传感阵列信号干扰抑制这一核心问题,对基于接触起电和静电感应耦合原理的自驱动传感单元和阵列结构进行了深入、系统的研究,取得了丰富的研究成果:

(1) 以基于接触起电和静电感应耦合原理的摩擦纳米发电机作为柔性传感器件的信号产生源,对接触-分离模式摩擦纳米发电机的柔性传感器件和单电极模式摩擦纳米发电机的柔性传感器件的结构和信号产生原理进行了详细的分析和比较。相对于接触分离式柔性传感器件的两层结构,单电极式柔性传感器件只需要接触分离式柔性传感器件的一侧结构,因此更加轻薄。在超薄、高分辨率等要求下,单电极式柔性传感器件遇到的器件结构设计、制作工艺等难度要远低于接触分离式柔性传感器件,因而在柔性传感器件的应用方面有更大的优势和更广阔的应用前景,最终确定了单电极式柔性传感器件作为柔性传感器件和阵列的单元结构设计方案;

(2) 在单电极式单元结构设计的基础上,设计并研究了三种单电极式柔性传感单元结构和四种传感单元阵列排布方式,并从抗干扰性、信号质量、制作工艺及空间利用效率等方面考察设计的三种单元结构和四种传感单元阵列排布方式。相互嵌套式单元通过将行列电极集成到一个传感单元的方式,实现了每个传感单元即是一个有效的传感阵列节点,大大提高了空间利用率。同时,相互嵌套式单元引入了层状屏蔽电极,有效的抑制了干扰信号。此外,相互嵌套式单元阵列采用了层叠式的制作工艺,制作难度和阵列可扩展性要远优于方块形单元阵列和工字形单元阵列。综合比较各种结构设计,最终选择带有屏蔽层的相互嵌套式的单电极式柔性传感器件单元和阵列作为柔性传感器件和阵列的设计方案;

(3) 利用有限元分析软件对相互嵌套式传感单元和阵列的结构和关键尺寸进行了模拟仿真,考察了屏蔽层、传感单元相对尺寸等对柔性薄膜传感阵列的信号输出的影响。结果显示,在引入带孔屏蔽电极层情况下,传感阵列模拟仿真得到的信号输出 NEXT 为 0.01,引入的带孔屏蔽电极层有效的抑制了干扰信号,仿真计算结果定量的评价了引入的屏蔽层对干扰信号的抑制效果。此外通过一系列的仿真模拟计算研究电

极的面积大小对传感阵列的信号输出幅值的影响,最终选择行列电极面积比为 1 作为传感单元内行列电极的设计方案;

(4) 以有限元分析的结果为基础,设计并制作 8×8 基于接触起电效应的相互嵌套式大面积自驱动柔性触觉传感阵列,并对摩擦层材料和电极材料进行了微观表征,同时实际测量了大面积自驱动柔性触觉传感阵列在单点触碰、多点触碰情况下的信号输出幅值,考察了制作的传感阵列信号输出的一致性以及在 100K 次测试条件下传感阵列信号输出的稳定性。结果显示在测量时,传感阵列信号输出幅值达到了 25 V,而干扰信号输出幅值约为 0.25 V, NEXT 值低至 0.01,证明了屏蔽电极层对于干扰信号的抑制效果。制作的传感阵列各单元信号输出幅值相差在 0.05 以内,具有非常好的一致性。经过 100K 次测试后,传感阵列的信号输出幅值几乎没有衰减;

(5) 为满足高分辨率场景下的应用需求,设计并制作了单元尺寸为 $500 \times 500 \mu\text{m}^2$ 的阵列为 60×60 的高分辨率自驱动触碰传感阵列,制作的传感阵列分辨率达到了 50 dpi,是目前报道的基于接触起电和静电耦合效应的传感阵列最高分辨率的 25 倍。制作的传感阵列 $3 \times 3 \text{ cm}^2$ 有效传感区域中包含了 3600 个传感单元,传感单元密度达到了 $400 \frac{\uparrow}{\text{cm}^2}$ 。制作完成的传感阵列厚度仅有 $20 \mu\text{m}$,具有非常好的柔性。此外,还利用了 ICP 刻蚀方法对摩擦层表面进行修饰,并且修饰后传感单元的信号输出提高了 5 倍。此外设计的小信号处理电路能够有效的处理高分辨率自驱动触碰传感阵列的输出信号,并将采集到的传感阵列输出信号进行滤波放大并进行数模转换,从而使得传感阵列的输出信号更加容易被识别;

(6) 结合信号处理电路展示了传感阵列在室内定位,电子签名,轨迹追踪及图案采集等方面的应用,展示了基于接触起电效应的柔性传感阵列在人机交互,安防,智能家居以及健康监护方面的应用前景。

8.2 后续工作与展望

本工作在基于接触起电效应的传感阵列信号干扰抑制方面取得了突破性的进展，首次在基于接触起电效应的传感阵列中引入了屏蔽电极层，同时设计了相互嵌套式的传感单元结构，将屏蔽电极，行电极和列电极集成到一个单元内，有效的提高了传感器件的二维空间利用率。为了进一步的利用设计的屏蔽电极和相互嵌套式传感单元结构，开发新的应用场景，后续工作可以从以下几个方面开展：

(1) 引入发光材料，对单元和阵列结构做一定的改进，并将其用于柔性显示，展示其在可穿戴设备等领域的应用前景。

(2) 利用静电纺丝方法制备基底层及电极层，结合光刻或者喷墨打印技术，并将其用于超薄触控、显示或者生物信号检测，展示其在可穿戴设备，健康监护以及安防等领域的应用前景。

(3) 结合场效应晶体管，引入柔性硅制作工艺，并将其用于触控及显示集成，展示其在人机交互，智能家居以及安防等领域的应用前景。