

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.11.001

# 一种可扩展的高灵敏电容式压力电子皮肤

滕飞<sup>1</sup>, 王贞体<sup>1</sup>, 刘平<sup>2</sup>, 郭欣欣<sup>1</sup>, 刘健<sup>1</sup>, 葛春雨<sup>1</sup>

(1. 国网安徽省电力有限公司 滁州供电公司, 安徽 滁州 239000; 2. 合肥工业大学 微电子学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:**文章通过无纺布倒模制备具有类金字塔形微结构的电容式传感单元, 基于码分多址传输方式设计并行采集的总线式编码电路结构; 将电容式传感单元与所设计的编码电路结合, 得到一种可扩展的高灵敏电容式压力电子皮肤。结果表明: 基于无纺布倒模的电容式传感单元具有超高的灵敏系数( $1.692\ 53\ \text{kPa}^{-1}$ )、快速响应时间(65 ms)和高重复性( $>1\ 250$  次); 基于码分多址的总线式采集电路结构可以极大地提高传感系统整体采集速率, 在  $4\times 4$  采集电路规模下是行列扫描电路采集速度的 16 倍, 显著提升了电子皮肤信息感知的实时性; 基于码分多址采集模式的电子皮肤在一定的物理损伤下仍能保留完整的传输功能。该研究为推进智能机器人的实时精确触觉感知提供了一种新的解决思路。

**关键词:**电子皮肤; 超灵敏; 电容式; 码分多址; 可扩展式阵列

**中图分类号:** TP212.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2024)11-1441-07

## A scalable and highly sensitive capacitive pressure electronic skin

TENG Fei<sup>1</sup>, WANG Zhenti<sup>1</sup>, LIU Ping<sup>2</sup>, GUO Xinxin<sup>1</sup>, LIU Jian<sup>1</sup>, GE Chunyu<sup>1</sup>

(1. Chuzhou Power Supply Company, State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Chuzhou 239000, China; 2. School of Microelectronics, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** In this paper, a capacitive sensing unit with pyramid-like microstructure was prepared by non-woven inverted mold. Then, based on the transmission mode of code division multiple access, the bus coding circuit structure of parallel acquisition was designed. Combining the capacitive sensing unit with the designed coding circuit, a scalable and highly sensitive capacitive pressure electronic skin (e-skin) was obtained. The results show that the capacitive sensing unit based on non-woven inverted mold has ultra-high sensitivity coefficient ( $1.692\ 53\ \text{kPa}^{-1}$ ), fast response time (65 ms) and high repeatability ( $>1\ 250$  cycles). The bus acquisition circuit structure based on code division multiple access can greatly improve the overall acquisition speed of the sensing system, under the scale of  $4\times 4$  acquisition circuit, it is 16 times the acquisition speed of row and column scanning circuit, which significantly improves the real-time perception of e-skin information. In addition, the e-skin based on code division multiple access acquisition mode can still retain the complete transmission function under certain physical damage. This study provides a new solution for promoting real-time and accurate tactile perception of intelligent robots.

**Key words:** electronic skin (e-skin); ultrasensitive; capacitive; code division multiple access; scalable array

## 0 引言

随着智能机器人与人机交互技术等领域的迅

速发展, 具有温度、压力等感知以及信息处理功能的柔性电子皮肤受到国内外学者的广泛关注, 在医疗机器人、人体健康监测以及仿生假肢等多个

**收稿日期:** 2022-09-22

**基金项目:** 浙江省“领雁”研发攻关计划资助项目(2022C03052); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2020HGTB0027)和国网安徽省电力有限公司滁州供电公司科技资助项目(B312M023000R)

**作者简介:** 滕飞(1979—), 男, 安徽滁州人, 国网安徽省电力有限公司高级工程师;

刘平(1983—), 男, 湖南娄底人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: liuping@hfut.edu.cn.

领域展现出巨大的应用潜力<sup>[1-3]</sup>。柔性电子皮肤在结构上主要包括柔性传感单元和电路采集系统两部分。

在柔性传感单元的研究中,电容式传感单元因其较好的动态响应和高稳定性的优势而成为制备电子皮肤的常见策略<sup>[4-5]</sup>。受大自然生物特有微结构启发,诸多高灵敏度传感单元被相继提出。文献[6]受具有高性能感应的皮肤表皮启发,通过砂纸模板与还原石墨烯氧化物组合,提出一种具有随机分布的棘状微结构的特殊表面形态,具有随机分布自旋(random distribution spin, RDS)微结构的石墨烯压力传感器在 0~2.6 kPa 的宽线性范围内灵敏度高达 25.1 kPa<sup>-1</sup>;文献[7]开发了具有倾斜微柱阵列电介质层结构的电容式传感单元,具有 0.42 kPa<sup>-1</sup> 的高压力灵敏度;文献[8]系统地研究了从几纳米到数百纳米甚至几十微米厚度的表面微圆柱结构,通过设计制备的对称双微共面石墨烯电极,使传感器灵敏度达到 7.68 kPa<sup>-1</sup>。但这些微结构的制备需要光刻、溅射等复杂的工艺流程,实际应用仍面临挑战。

在电路采集系统的研究中,大面积的柔性电子皮肤是实现智能机器人等领域动态信息感知所必须的,但目前主要采用分离点测试和行列扫描寻址的采集方式。文献[9]以聚酰亚胺(PI)材料构成叉指电极,制作了一种高灵敏度、高线性度的柔性触觉传感阵列,其采用分离点测试的采集方式,实现对每个传感单元信号的实时采集;文献[10]报道了一种基于形状记忆聚合物(shape memory polymer, SMP)驱动器的高分辨率柔性主动皮肤,其矩阵为 32×24 个可单独寻址的触觉像素,间距为 4 mm,每个像素点可以通过行/列寻址单独控制,需要 2.5 s 才能锁定到不同的状态。但随着电子皮肤规模的增加,采集速度会受到每个器件延迟累积的严重影响,无法对高度局部和短暂的外部刺激做出快速反应,同时,布线和制造过程的高复杂性阻碍了其在大面积应用下的发展<sup>[11-12]</sup>。

本文制备一种可扩展式高灵敏的电容式压力电子皮肤。采用无纺布倒模的方式制备具有类金字塔型微结构的电容式传感单元,制备流程简单且成本低;采用码分多址的总线式并行采集方式,采集速度快且能够减少布线资源。构建出的电容式压力电子皮肤具有超高的灵敏度,可以准确地监测微小应变,采集速度不受阵列规模限制,同时具有一定的抗物理损伤功能。

## 1 柔性传感单元研制

### 1.1 传感器制备方法

具有类金字塔型微结构的电容式压力传感器制备流程如图 1 所示。

首先对无纺布进行高温浸蜡处理,经过浸蜡处理后的无纺布在常温条件下静置数秒其表面蜡液即可固化;然后将液态硅橡胶倾倒在经过浸蜡处理后的无纺布上,使用真空旋转涂膜机对液态硅橡胶进行旋涂成膜处理,使无纺布表面的硅橡胶薄膜的厚度均匀;静置固化后对硅橡胶薄膜进行脱模处理,因为使用了蜡液在无纺布表面充当介质,所以硅橡胶薄膜可以很好地从无纺布上剥离并极大程度地保存类金字塔型微结构;最后在具有类金字塔型微结构的硅橡胶表面刷涂碳纳米管(carbon nanotubes, CNT)溶液,等待 CNT 干燥后,在其表面粘贴银电极,将上、下两层具有类金字塔型微结构的硅橡胶薄膜对贴,即制备得到具有类金字塔型微结构的电容式压力传感器。

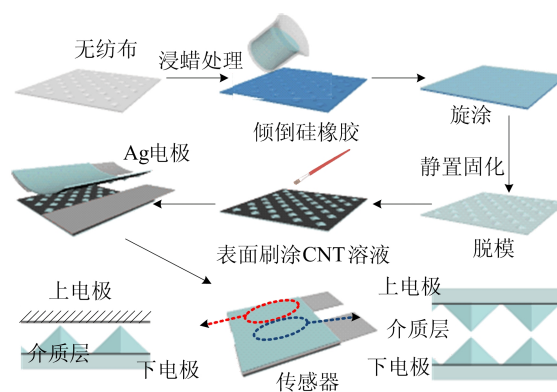


图 1 传感器制备流程

制备的传感器样品及微观形貌如图 2 所示。

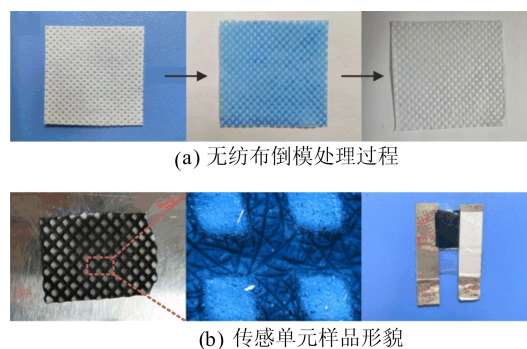


图 2 传感器样品及微观形貌

从图 2a 的光学照片可以看出,无纺布显现出均匀且致密的网孔装结构,经过浸蜡处理后的无

织布极大地保留了原始网孔状结构,并没有被蜡液所填充。经过倒模得到的硅橡胶薄膜微结构表现出良好的一致性和均匀性,之后在微结构薄膜表面刷涂 CNT 溶液,由于微结构的存在使得绝大部分的 CNT 将会沉积在沟壑底部,而微结构上几乎不存在碳系材料。图 2b 展示了本文制备而成的电容式压力传感器实物。

### 1.2 传感器模型与工作原理

电容式压力传感器主要由两端的导电极板和中间的介质层组成,忽略边缘效应时,电容  $C$  的计算公式为:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1)$$

其中:  $d$  为两极板间距;  $\epsilon_0$  为真空介电常数;  $\epsilon_r$  为极板间电介质的相对介电常数;  $A$  为两极板的重叠面积。

由此可以推导出金字塔型电解质电容器的计算公式<sup>[13]</sup>为:

$$C = 8 \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 \epsilon_2}{k(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \left\{ \frac{a}{2} - \frac{\epsilon_1}{k(\epsilon_2 - \epsilon_1)} \ln \left[ 1 + \frac{ak(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{2\epsilon_1} \right] \right\} + \frac{\epsilon_0 \epsilon_1 (A - a^2)}{d} \quad (2)$$

其中:  $k$  为金字塔型微结构的斜面斜率,  $k = 2d/a$ ;  $a$  为金字塔形微结构的底边长;  $d$  为金字塔形微结构的高;  $\epsilon_1$  为空气的相对介电常数;  $\epsilon_2$  为微结构材料的相对介电常数。

使用 COMSOL 有限元分析软件对具有类金字塔型微结构的电容式压力传感器进行应力、应变仿真分析。将两组相互对称的金字塔型微结构对称放置,在其顶部施加压力载荷,有限元仿真结果如图 3 所示。

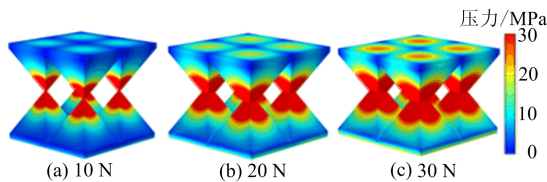


图 3 有限元仿真实验验证

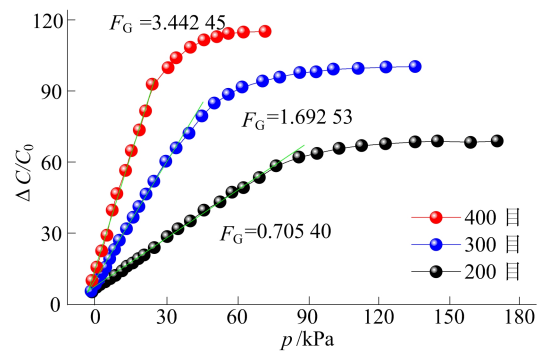
由图 3 可知,随着所施加压力的逐渐增加,金字塔型微结构出现相互挤压,从金字塔底部至顶部应力逐渐增加,金字塔结构底部产生的形变位移相较于顶部较小,因此沉积在金字塔型微结构底部的 CNT 溶液不会因所施加的压力变化而产生较大变化,但金字塔型微结构顶部所发生的位移会造成金字塔结构之间空气间隙的减少,从而

导致电容式传感器的电介质层整体相对介质常数发生变化。

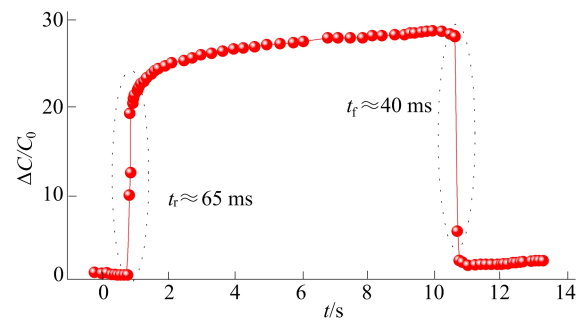
### 1.3 传感器特性测试与分析

本文测试由不同目数无纺布倒模制备的微结构传感单元电容相对变化与施加压力的关系,探究微结构尺寸大小对传感单元灵敏系数的影响,结果如图 4a 所示。分别使用 200、300、400 目的无纺布制备具有不同尺寸大小的金字塔微结构。由图 4a 可知,使用 400 目无纺布倒模所得到的金字塔微结构尺寸更小,从而使其具有相对更高的灵敏系数,但同时传感范围也相对最小;而使用 200 目无纺布倒模而成的微结构传感单元金字塔微结构尺寸更大,在施加压力时微结构变形范围也将更宽,从而具有更宽的传感范围,但灵敏度也相对较低,仅为  $0.70540 \text{ kPa}^{-1}$ 。因此本文最终选取 300 目的无纺布倒模制备微结构传感单元,以期兼具较高的灵敏系数和较宽的传感范围,最终设计制备完成的传感单元灵敏系数为  $1.69253 \text{ kPa}^{-1}$

对制备的传感单元施加  $15 \text{ kPa}$  的瞬态压力并测试其响应时间,结果如图 4b 所示。由图 4b 可知,电容式传感单元响应时间约为  $65 \text{ ms}$ ,具有快速响应速度,恢复时间约为  $40 \text{ ms}$ 。这主要归因于金字塔微结构材料的卓越弹性。



(a) 不同目数无纺布传感单元的影响



(b) 传感单元响应时间

图 4 传感单元灵敏系数与响应时间

为了验证本文传感单元在各种应变下的可靠

响应与稳定性,对传感单元施加步进为 0.5 kPa 的台阶测试,结果如图 5a 所示。对传感单元逐步增加压力时,在其达到应变后保持稳定前,会发生一个较小的抖动现象,电容会先降低再保持稳定,这主要是由复合材料的弹性滞后引起的。

在 20 kPa 压力条件下,对传感单元施加不同频率的压缩-释放循环,如图 5b 所示。由图 5b 可知,拉伸周期峰值的数目与测试频率相匹配,表明该传感单元对机械刺激反应迅速,同时拉伸频率的变化并没有引起传感单元电阻产生较大的偏移。

对传感单元施加 0~50 kPa 的循环测试,压缩频率为 1 Hz,电容变化如图 5c 所示,可以看出,在经过 1 250 次循环后传感单元仍展现出良好的重复性。

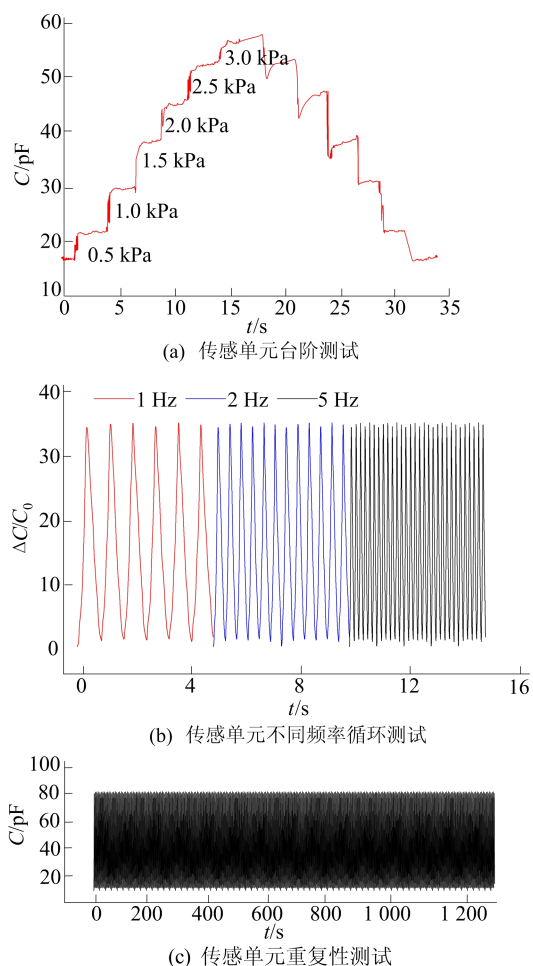


图 5 传感单元动态特性测试结果

## 2 触觉信息提取系统

### 2.1 触觉信息提取系统设计框架

传统的阵列式触觉信息提取系统多采用基于

时分多址的行列扫描式技术,通过利用多路选通器在时间域上对每个传感器输出的信号分别进行采集<sup>[14]</sup>,但是这种采集方式在大面积的传感器阵列下不再适用,系统整体的采集速率低,同时在受到物理损伤的情况下功能损坏会相对较大。本文基于码分多址技术<sup>[15]</sup>设计了一种触觉信息提取系统,通过对每个传感器所采集得到的信号分别进行编码,再借助加法器电路使各编码输出信号叠加到统一的数据总线上,然后利用编码码元的高自相关性和低互相关性来实现各传感器采集得到信号的分辨分离。

该触觉信息提取系统设计框架如图 6 所示。基于码分多址的触觉信息提取系统中的每一个传感器每时每刻均在进行信号采集,系统整体的采样率相对于时分多址的采集方式采集速率更高。

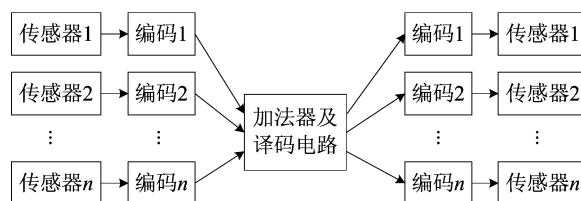


图 6 触觉信息提取系统设计框架

### 2.2 编、译码系统原理

在基于码分多址的触觉信息提取系统中,对于各个电容式传感器所输出的信号首先使用地址码序列对其进行编码加密处理,并将编码信号输出到数据总线上,在译码端使用与编码端相同的地址码序列对接收到的总线数据进行相关处理,恢复出原始的传感单元信息,而数据总线上传感单元信号的解析依赖于地址码序列的强自相关性和弱互相关性。

本文是以 Pearson 相关系数<sup>[16]</sup>来衡量两地址码之间存在的相关性,Pearson 相关系数  $r$  的计算公式为:

$$r = AB^{-\frac{1}{2}},$$

$$A = \sum xy - \left( \sum x - \sum y \right) N^{-1},$$

$$B = \left[ \sum x^2 - \left( \sum x \right)^2 N^{-1} \right] \times \left[ \sum y^2 - \left( \sum y \right)^2 N^{-1} \right] \quad (3)$$

其中:  $x$ 、 $y$  分别为地址码序列;  $N$  为序列长度; 相关系数  $r$  取值在  $-1 \sim 1$  之间,  $|r|$  越大,两序列的相关性越大。

以长度为 63 的 gold 序列地址码举例说明。

首先分别取地址码序列为 3、6、9、12、16 组,再对这些不同组数的地址码序列求取相关系数,结果如图 7 所示。

从图 7 可以看出地址码序列之间的自相关系数:当地址码序列相同时,相关系数 $|r|$ 的值最大,显现出极强的自相关性;而当地址码序列不相同,相关系数 $|r|$ 的值极小,低于 0.1,即与其他地址码之间几乎不相关。

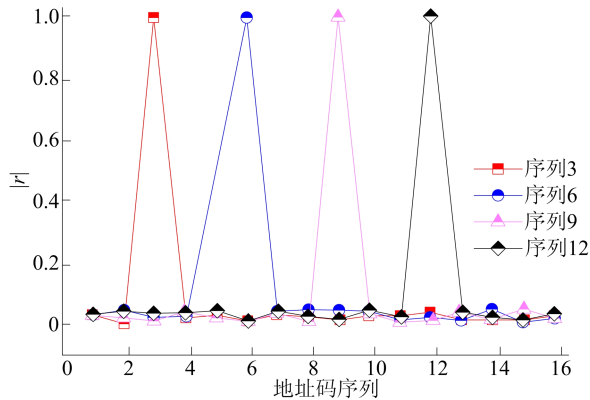


图 7 地址码相关性

基于码分多址的编码、译码系统原理如图 8 所示。

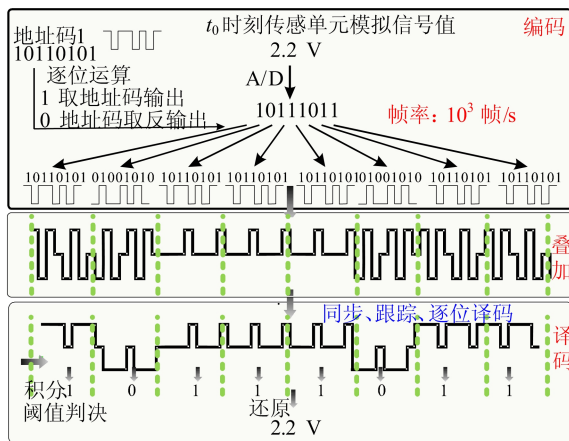


图 8 编、译码系统原理

$t_0$  时刻传感单元的原始信号经过模数转换器转换为二进制信号,按照每个传感单元唯一的地址码逐位进行编码。在编码时,若传感单元二进制信号为 1,则输出信号与地址码信号相同;若传感单元二进制信号为 0,则输出信号与地址码信号逐位取反;输出信号的帧率为传感单元信号采样速率与地址码宽度的乘积。各传感单元的输出信号经过叠加形成总线信号,此时各传感单元由于独立而存在时延问题,在总线数据叠加时数据

不一定完全对齐,但对于信号的译码并不影响。

各传感单元在译码时,首先需要完成地址码的同步以寻找数据的帧头,然后跟踪数据对其进行逐位译码,译码与编码方法类似,逐位进行数据的相同或相反输出,但此时的对称轴为传感单元数量的中间值。在译码完成后,需要对各帧的数据进行积分计算,通过与阈值的对比判决,输出二进制译码信号,最后将二进制信号还原为原始十进制传感单元信号。

### 2.3 编、译码电路软件程序设计

基于码分多址的触觉信息提取系统编、译码电路软件程序设计如图 9 所示。

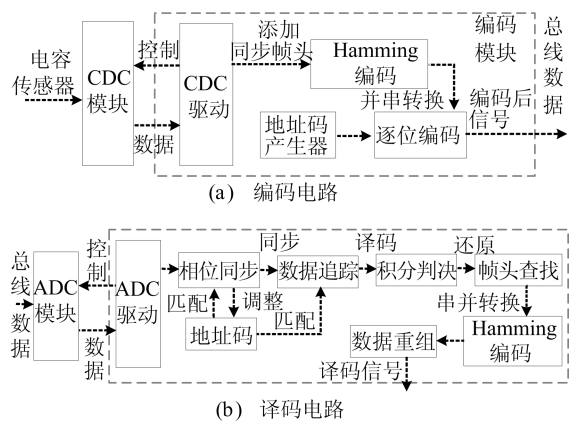


图 9 编、译码电路软件程序设计

从图 9a 可以看出,在编码电路主要由电容数字转换(capacitive digital converter, CDC)模块和编码模块组成, CDC 模块负责将传感器因外力作用下的电容变化信号转换为数字信号,并将其提供给编码模块,编码模块通过 CDC 驱动以控制 CDC 模块和接收数据,然后对数据依次添加同步帧头,借助 Hamming 编码在数据中添加监督位以降低加性干扰影响,之后将并行数据转换为串行数据,依次逐位进行编码后输出到数据总线上。

从图 9b 可以看出:在译码电路中,首先利用模数转换(analog-to-digital converter, ADC)模块对总线数据进行采样,由于不确定地址序列编码时的初始相位,需先经过相位同步模块寻找到编码后数据的初始相位;之后相位同步模块实现相位同步后将输出使能信号,对地址码宽度区间范围内的数据进行定积分,数据跟踪模块将依据同步使能信号及定积分数据,对同步后的编码后数据进行译码;此时,还原译码出来的串行数据为 Hamming 编码后的串行数据,因此需要对数据进行帧头查找、串并转换和校验,还原出 Hamming

编码前的并行数据,经高低位重组并最终输出。

### 3 电子皮肤系统设计及应用

#### 3.1 模块化编码单元结构及系统扩展性

基于码分多址的触觉信息提取系统依靠编码电路单元的模块化结构设计和总线传输的优势,可解决当前柔性传感器阵列移植性差、不易扩展的问题。编码电路单元的模块化可扩展结构设计如图 10a 所示,电容式传感器输出信号经信号提取电路与编码电路后进行输出,在编码电路单元四周设计有相同的扩展接口(2 个电源接口和 1 个数据接口),4 组接口完全相同且相互连通,因此任意数据接口都可视为数据总线接口,从而任意单元都可通过扩展接口相连。依靠码分多址的总线传输方式和编码电路单元的模块化可扩展结构设计,本文制备而成的柔性传感器阵列可以任意拼接扩展,同时在外多处位点经受剪切破坏时仍能保留完整的功能,具有一定的高鲁棒性,如图 10b 所示。

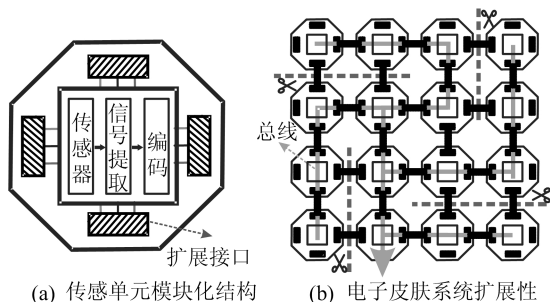


图 10 模块化单元结构及系统扩展性

柔性传感器阵列经常依靠接触来感知环境,容易磨损而受到破坏。2 种采集传感单元数据的电路结构如图 11 所示。

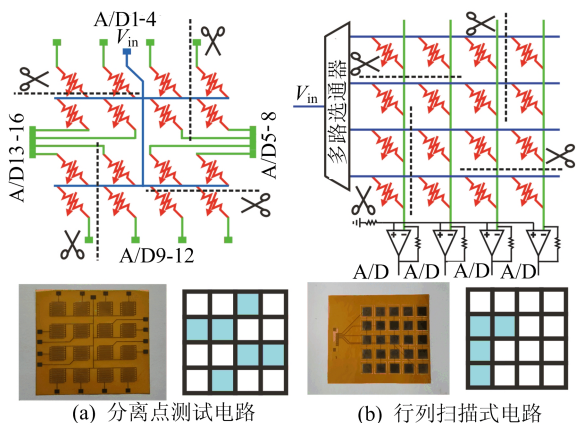


图 11 2 种数据采集方案对比

从图 11a 可以看出,分离点测试方法对每一个传感单元单独进行布线采集,能够最大程度地采集传感单元数据信息,但是其布线相对比较复杂,同时在受到外界破坏时,将会因布线的位置不同而受到不同程度的功能损坏。

从图 11b 可以看出,行列扫描的采集方式通过使用多路选通器来进行时间域的划分,在每一个时间单位上对不同的传感单元信号进行采集。这将极大地减少布线资源消耗,但同时会因行列扫描单元数量的增加,数据丢失量也将更大。在受到物理损伤时,传感单元也将受到最大程度的破坏,功能也会随之被破坏。相比之下,基于码分多址的触觉信息提取系统在承受机械损伤的情况下仍然能够继续对外界信号输出反馈信号。

#### 3.2 触觉传感阵列实验测试

为测试电容式压力传感单元的感知效果与编码单元的输出结果,将其布置于人体手腕上进行人体脉搏波微弱生理参数的小应变测试,使用示波器监测编码电路输出结果,利用 LabVIEW 上位机对经过译码后的传感单元采集数据进行显示,如图 12 所示。

从图 12 可以看出,所设计制备的电容式压力传感单元可对微小应变下的脉搏波清晰感知,展现出较高的灵敏性,同时所设计的编码电路输出结果具有周期性,符合预先地址码编码设计。

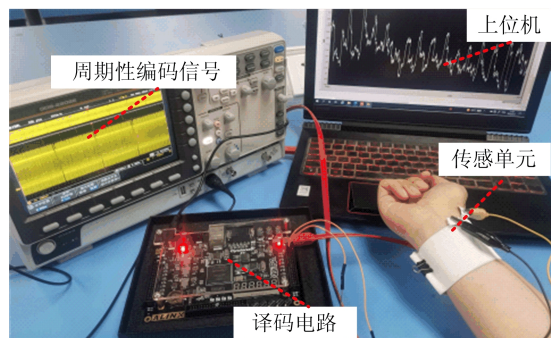


图 12 人体脉搏采集测试

将所设计制备的电子皮肤布置于机械手上进行抓取测试,以展现电子皮肤整体感知性能。机械手抓取物体测试如图 13 所示。其中,  $S_{ij}$  表示传感单元。

从图 13a 可以看出,电子皮肤可对物体展现不同的峰值映射,具有较强感知功能;从图 13b 可以看出,随着抓握程度的增加,木块分别与不同的传感单元进行接触,所设计制备的电子皮肤能对抓取过程中的动态变化清晰感知并传输。

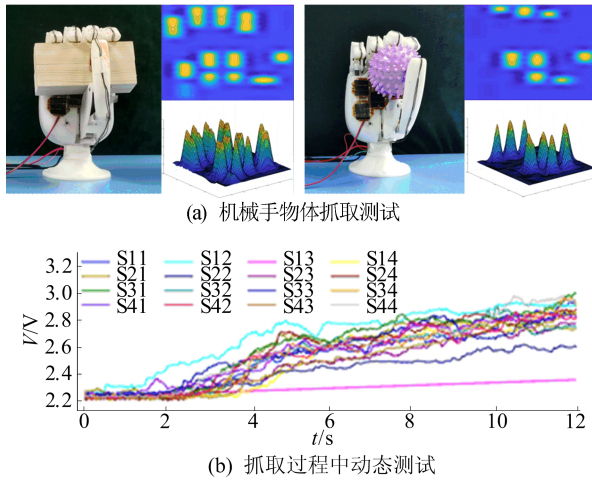


图 13 机械手抓取测试

## 4 结 论

本文通过无纺布倒模制备出具有类金字塔结构的电容式压力传感单元,其灵敏系数可达  $1.692\ 53\ \text{kPa}^{-1}$ ;基于码分多址的总线式并行采集电路结构各传感单元相互独立采集,采集速率完全不受阵列规模的限制;传感单元与采集电路集成构建成为柔性电子皮肤,易于扩展且同时具有一定的抗物理损伤特性,可准确监测机械手抓取过程中每个传感单元的压力大小。本研究所设计制备的电子皮肤在智能机器人触觉感知、人造假肢触觉延伸等领域具有广阔的应用前景。

## [参 考 文 献]

- [1] FANG X, LIU Z M, HAO Y F, et al. A soft actuator with tunable mechanical configurations for object grasping based on sensory feedback [C]//2019 2nd IEEE International Conference on Soft Robotics. [S. l.]: IEEE, 2019: 25-30.
- [2] ZHANG Q, SHEN L, LIU P, et al. Highly sensitive resistance-type flexible pressure sensor for cuffless blood-pressure monitoring by using neural network techniques[J]. Composites Part B(Engineering), 2021, 226: 109365.
- [3] MOHAMMADI A, LAVRANOS J, TAN Y. A paediatric 3D-printed soft robotic hand prosthesis for children with upper limb loss[C]//2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society. [S. l.]: IEEE, 2020: 3310-3313.
- [4] QIU J, GUO X H, CHU R, et al. Rapid-response, low detection limit, and high-sensitivity capacitive flexible tactile sensor based on three-dimensional porous dielectric layer for wearable electronic skin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(43): 40716-40725.
- [5] ZHANG S P, CHHETRY A, ZAHED M A, et al. On-skin ultrathin and stretchable multifunctional sensor for smart healthcare wearables[J]. NPJ Flexible Electronics, 2022, 6: 11.
- [6] PANG Y, ZHANG K N, YANG Z, et al. Epidermis microstructure inspired graphene pressure sensor with random distributed spinosum for high sensitivity and large linearity[J]. ACS Nano, 2018, 12: 2346-2354.
- [7] LUO Y S, SHAO J Y, CHEN S R, et al. Flexible capacitive pressure sensor enhanced by tilted micropillar arrays[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(19): 17796-17803.
- [8] YANG J, LUO S, ZHOU X, et al. Flexible, tunable, and ultrasensitive capacitive pressure sensor with microconformal graphene electrodes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(16): 14997-15006.
- [9] ZHAO X F, HUANG C Z, LU H L, et al. A skin-like sensor for intelligent Braille recognition[J]. Nano Energy, 2020, 68: 104346.
- [10] BESSE N, ROSSET S, ZARATE J J, et al. Flexible active skin: Large reconfigurable arrays of individually addressed shape memory polymer actuators[J]. Advanced Materials Technologies, 2017, 2(10): 1700102.
- [11] FU Y F, YI F L, LIU J R, et al. Super soft but strong e-skin based on carbon fiber/carbon black/silicone composite: truly mimicking tactile sensing and mechanical behavior of human skin[J]. Composites Science and Technology, 2020, 186: 107910.
- [12] HUANG Y, WANG Y, SUN X H, et al. Superelastic and large-range pressure sensor with hollow-sphere architectures for wearable electronic skin [J]. Smart Materials & Structures, 2020, 29(4): 045014.
- [13] 钟旭燕. 压敏型柔性电容传感器介电层的微结构设计[D]. 大连:大连理工大学, 2018.
- [14] KIM D, LEE D K, YOON J, et al. Electronic skin based on a cellulose/carbon nanotube fiber network for large-area 3D touch and real-time 3D surface scanning[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(44): 53111-53119.
- [15] 杜勇. 数字调制解调技术的 MATLAB 与 FPGA 实现[M]. 北京:电子工业出版社, 2015: 375-416.
- [16] BENGTT K. Statistics for dummies[M]. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley Publishing, 2016.

(责任编辑 胡亚敏)