

# 一种一体化集成的脉搏检测装置

孙庆霞, 王宇航, 李婕菲, 周海睿, 杨舒婷

(中国海洋大学, 青岛 266100)

**摘要:** 在日常生活中持续监测脉搏率对于了解包括高血压在内的许多健康状况至关重要。除了在医学诊断方面的重要性外, 脉搏率监测平台还可以促进疾病与个人行为、日常习惯和生活方式的相关性, 从而有可能分析根本原因、预测和预防疾病。虽然传统的脉搏监测装置存在, 但它们体积庞大且侵入性强。在这里, 我们介绍了一种一体化集成的脉搏监测装置, 通过腕带式加压装置, 可以更便捷的获取脉搏数据。传感器采用丝网印刷方法印刷微结构, 增加了传感器的灵敏度, 并且由三个传感器组成的阵列, 进一步提高了数据的可靠性。

**关键词:** 压力传感器; 柔性; 灵敏度; 结构;

## 1 传感器设计背景和应用价值

### 1.1 设计背景

脉搏监测一直以来都是反映人体状况的重要参考资料, 对于医疗诊断和生活健康管理都具有重要价值。然而, 传统的脉搏监测设备存在一些局限性, 如体积较大、不够灵活、数据采集不便捷等问题。因此, 如何改进脉搏监测设备, 以适应现代需求, 是当前技术发展的一个关键方向。

目前, 现有的脉搏传感器通常较大, 无法实现足够的小型化和柔性化。这在需要监测人体表面脉搏时尤为明显, 因为大面积传感器在弯曲或皮肤表面适应性上存在问题, 可能会导致数据采集的干扰。此外, 传统的脉搏传感器通常需要笨重的硬连接接口来进行数据采集, 这不仅不舒适, 还可能刺激皮肤表面, 影响数据的准确性。

因此, 改善脉搏监测设备的方向之一是增加其与人体表面的贴合性, 以实现更加舒适和稳定的数据采集。另外, 还需要改进传感器的小型化和柔性化, 以便更好地适应皮肤曲线, 确保脉搏信息的准确采集。同时, 借助现代通信技术, 如蓝牙传输, 可以实现数据的无线传输, 提高了数据采集的便捷性。这些改进将有助于提高脉搏监测的质量和效率, 为患者提供更好的医疗服务和健康管理体验。

### 1.2 应用价值

近年来, 柔性传感检测装备尤其在人体生理及生化指标监测方面表现出了极大的应用潜力。因此各种穿戴式健康监测设备也因此应运而生。目前, 可穿戴式设备向着更加小型化、

<sup>0</sup>第一作者: 姓名: 孙庆霞; 性别: 女; 职称: 硕士; 研究生研究方向: 柔性传感器; 邮箱: 1549180979@qq.com

通信作者: 1; 姓名: 李俊漾; 性别: 男; 职称: 副教授; 研究方向: 微纳机器人; 邮箱: lijunyang@ouc.edu.cn

2; 姓名: 高立波; 性别: 男; 职称: 副教授; 研究方向: 微纳传感器; 柔性传感; 智能医疗仪器; 邮箱: lbgao@xmu.edu.cn

高集成化、高柔性化的方向发展。高柔性化和小型化的器件可实现与人体更好地贴合，便于实现“无感”的穿戴和实时在线的“在体”检测，便于人体健康大数据的采集。而基于柔性可穿戴传感器件，可以提高脉搏信号传感性能，并具备便携、移动、集成度高及操作简单等使用优点，在脉搏波检测中展示出了非常好的应用前景。基于一体化中医脉诊的柔性脉搏检测装置，模拟医师诊脉模式采集脉搏信号，利用高度集成、蓝牙传输的柔性压力传感器以与人体的体表进行共形贴合，可以更加舒适、便捷的监测患者的脉搏信息，可实现一体化中医脉诊的人机交互功能。因此，基于柔性电子的脉搏检测装置可以在传统脉诊仪的基础上实现更好的性能优化，同时，相比于现有体积庞大的脉诊仪，便携式、移动式、小型化、蓝牙传输和实时连续监测的实现，都可使得柔性中医脉搏检测设备不仅便于在临床的使用和推广，而且也更加有利于实现个人及家庭的数字化健康诊断与治疗，真正满足医疗个性化功能检测的需求。

## 2 创新点与优势

一体化中医脉诊的柔性脉搏检测装置相比于传统的脉搏传感器，其创新点与优势在于检测设备拥有高度集成化，测量准确度高，人机交互性强，柔性的装置与人体贴合度高的特点。

该柔性脉搏检测装置一体化集成了柔性中医脉诊的传感器贴片、环形气囊和气囊施压装置，体积小，重量轻，结构稳定，集成度高，属于便携式可穿戴的医疗检测设备。

传感器贴片内部包含三个传感器单元，能够避免单个传感单元在检测过程中只能获取单一信息的缺陷，三个传感单元同时传输三路数据以便获取更全面的脉诊信息，从而提高数据采集的效率。放置的加压气囊包覆压力传感器在测试时会对传感器贴片提供强度适宜的压力，能够更准确的获测量脉搏数据。

通过此检测装置采集到的数据可通过无线蓝牙传输的方式发送至 PC 端和手机端，可以实时监测脉搏信号，迅速反馈实时数据，人机交互性更强。这对于医生来说，可以更及时地了解患者的脉搏状况，为诊断和治疗提供参考；对于患者来说，可以实时了解自己的脉搏状态，及时采取相应的健康管理措施。

装置采用柔性基底和硅胶材料进行封装，保证了检测装置与人体皮肤的良好贴合，为用户提供了舒适无刺激的检测环境和更好的体验感。

综上，一体化中医脉诊的柔性脉搏检测装置具有设备集成度高，测量准确度高，人机交互性强，体验感好的显著优势。

## 3 实现方案简介

### 3.1 设计原理

我们提出了一种电容式压力传感器，它的工作原理主要为：典型的电容式传感器由上下电极、绝缘体和衬底构成。当薄膜受压力作用时，薄膜会发生一定的变形，因此，上下电极

之间的距离发生一定的变化，从而使电容发生变化。脉搏跳动对其施加的压力或应力作用在传感器的感应电极导致传感器内部的薄膜受到压力或应力的作用，发生应变，其容积发生变化。薄膜的应变最后导致感应电极和固定电极之间的电容发生变化。传感器内部的电路测量电容变化，并将其转化为电信号。

典型的柔性电容式应变传感器一般为由一对可拉伸电极夹层介质绝缘层的三明治结构，传感机制基于应变对电容区调控。在其受拉伸时，电容式传感器的响应表现为区域形变的形变和介质层厚度的变薄，从而使得电容增加。以并联平行板式电容器为例，平行板初始长度为  $l_0$ ，宽度为  $w_0$ ，绝缘层厚度为  $d_0$ ，初始电容如下定义，

$$C_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{l_0 w_0}{d_0} \quad \text{公式 1}$$

其中， $\varepsilon_0$  和  $\varepsilon_r$  分别表示真空的介电常数和介质的相对介电常数。依据泊松定律，当材料在一个方向被拉伸时，那么它会在反向收缩。那么当传感器受外界拉伸应变  $\varepsilon$  时，电容器长增加为  $(1+\varepsilon)l_0$ ，应的宽减为  $(1-\nu_{\text{electrode}})w_0$ ，介质层厚度减小为  $(1-\nu_{\text{electrode}})d_0$  和  $\nu_{\text{electrode}}$  分别为可拉电极和介质层的泊松比。对于可拉伸电容式应变传感器，我们假定可拉伸电极和介质层具有相同的泊松比，则拉伸后的电容为：

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{(1+\varepsilon)l_0(1-\nu_{\text{electrode}})w_0}{(1-\nu_{\text{electrode}})d_0} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{(1+\varepsilon)l_0 w_0}{d_0} = (1+\varepsilon)C_0 \quad \text{公式 2}$$

因此，电容型柔性应变传感器的电容随着应变线性变化。值得注意的是，这个线性只适用于小应变区间，如果应变过大，不同轴间泊松比的线性关系将不再适用。最后我们通过信号处理电路对电容变化的信号进行放大、滤波等处理，得到最终的压力值。

### 3.2 设计方法

我们提出了一种可以实现三路数据输出的脉搏检测装置，包括一种一体化集成柔性中医脉诊的传感器贴片、环形气囊和气囊施压装置。

为了得到稳定并且具有一定精度传感器，我们选取叉指电极作为固定电极，感应电极为涂覆了氮化硼敏感层与微结构的柔性基底（柔性基底可为热塑性聚氨酯（TPU）、聚烯系弹性体、聚苯乙烯系弹性体、聚酰胺系弹性体、硅橡胶、苯乙烯嵌端共聚物等多种聚合物中的一种以及纸张、皮革、布等纤维材料）。传感器贴片为三个共面圆形柔性叉指电极与 FPCB 电路板封装而成，电极通过蛇形曲线连接，可允许一定的拉伸，每个电极的导线经过蛇形曲线连接到接口处，环形气囊为一种腕带式加压装置，把传感器贴片用薄双面胶固定在皮肤上，使用腕带式环形气囊包裹住，用气囊施压装置控制加压。当给传感器施加压力时，因为微柱结构，圆形叉指电极与敏感层之间的接触面积发生变化，引起传感器阻值变化，从而导致传输数据的改变，传感器贴片爆炸视图如图 1 所示。

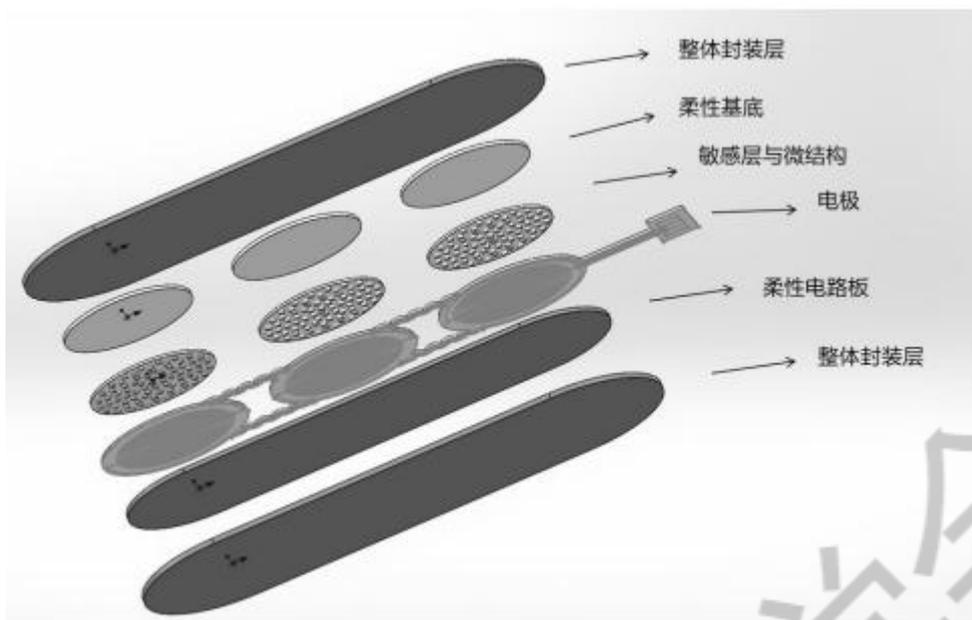


图1 传感贴片视图

我们将传感器与柔性电路板通过硅胶封装成一种柔性贴片，贴片放置于腕部。电路中含有电池模块与蓝牙模块，可以进行充放电与三路数据的发送，软硬件架构如图2所示。

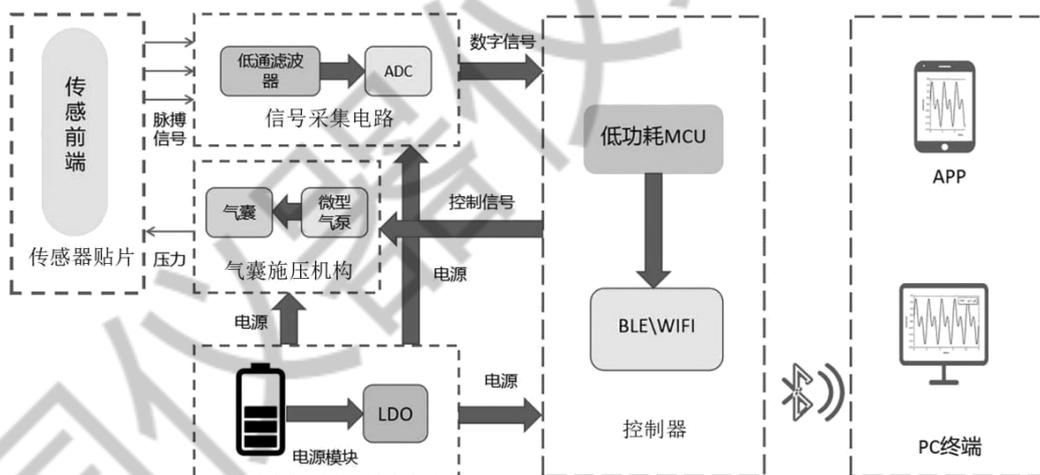


图2 软硬件架构图

### 3.3 实验验证过程

采用拉力试验机 ZQ990B，使用圆形按压头（按压头的胡克系数为 0.14，按压面积为 4cm<sup>2</sup>）施加压力，模仿动脉搏动。将传感器固定在底座上，圆形按压头在其上方以 30 mm/min

的速度下压, 单次下降的位移为 6 mm, 接触传感器后圆形按压头先后对传感器施加 1-10Kpa 的压力, 随后上升复位, 每次圆形按压头运动前静止 2s。数据接收端的 LCR 电桥 TH2840B 可以实时的显示监测到的压力波形。

### (1) 脉搏测试

通过对人体脉搏探测功能的研究, 验证压力传感器阵列的适用性。3 通道传感器阵列直接贴附在手腕上, 以检测不同位置(寸、关、池)的动脉搏动, 如图 3 所示。

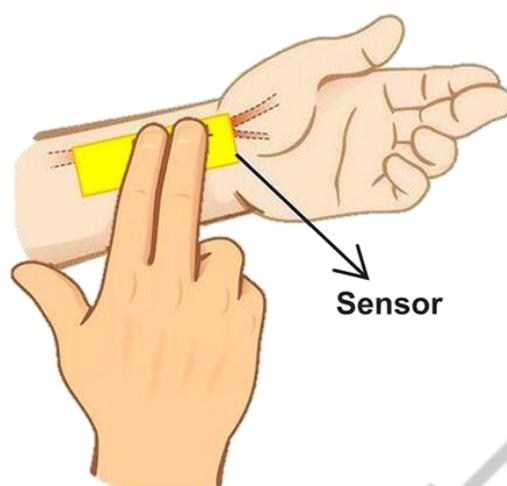


图 3 柔性脉搏检测装置贴放示意图

脉搏波测量过程中, 首先要求测试者静坐 10 分钟, 避免因为情绪上的波动对测试产生影响。测试的时候, 测试者要保持坐姿端正, 脊柱不要弯曲, 手臂自然前伸, 与心脏位置差不多保持在齐平。手腕面向上, 放松手掌避免攥拳以保持血脉畅通。在测试的过程中, 测试者尽量保持一个稳定的姿势, 因为不同的体位下, 人体的一些血流动力学参数(血流惯性、外周阻力、动脉顺应性)也会发生相应的改变, 进而使得脉搏发生变化。此外, 测试者姿势的改变, 也会导致贴附在皮肤表面的压力传感器与测量部位产生位置上的相对变化, 使得脉搏波形发生突变。当测试者处于静坐状态 10 分钟后, 使用气囊加压使传感器紧贴皮肤表面。尺、关、寸波形数据通过接收端的 LCR 电桥 TH2840B 可以实时的显示脉搏波形。同时, 使用医用血压计收集测试者的血压和心功能参数以做对比。