

一种离电型高灵敏度柔性水听器的设计

李吉昊, 杨舒婷, 王宇航, 滕延越, 张帅

(中国海洋大学, 青岛 266000)

摘要: 提出了一种应用于水下环境的离电型高灵敏度柔性水听器的设计。该水听器的主要由高灵敏度离子感知膜制备而成, 主要包括水听器高灵敏度感知膜, 柔性离电型传感器, 聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 作为封装材料, 具有柔性可贴附、能够监测水下低频声波的特点。

关键词: 柔性水听器; 高灵敏度; 传感器; PDMS 封装;

1 传感器设计背景和应用价值

1.1 设计背景

针对潜器贴附和海洋低频信号的高精度监测需求, 进行离电型高灵敏度水听器结构设计和制造技术研究, 实现对水下声纳系统的高精准探测。通过设计离电型水听器高灵敏度感知膜微观结构、水听器整体结构以及突破水听器集成工艺的关键技术, 研制离电型高灵敏度水听器, 满足高灵敏度、多元应用场景的海洋传感器应用需求。

1.2 应用价值

面向敏感区域水下反潜探测监视系统与装备的重大需求, 本作品提出的离电型高灵敏度水听器基于双层电容传感原理, 拥有薄而灵活的架构和低频高灵敏度等优异力学和电学传感性能, 在应用于舰艇、无人潜航器、岸基声纳和海底基阵等军事领域有典型优势, 对提升水下目标检测水平、服务水下综合作战系统具有重要研究意义。

2 创新点与优势

传统水声传感器核心敏感元件主要采用基于石英或陶瓷等块体材料, 器件不仅体积庞大, 价格昂贵, 不利于布放, 因此仅仅局限于一些特殊应用或高端应用。本作品的柔性离电型高灵敏度水听器基于双层电容传感原理, 通过对离电型高灵敏度水听器感知膜微结构和整体结构的设计, 使其具备低频高灵敏度和柔性可变形等优异力学和电学性能。与传统水声传感器相比, 柔性离电型水声传感器在应用于舰艇、无人潜航器、岸基声纳和海底基阵等军事领域有典型优势, 该器件能够安装在各种表面上, 并能根据需要进行快速部署和重新定位, 无需进行复杂的修改和安装, 同时具备低频高灵敏度等优异的传感性能。

3 实现方案简介

3.1 设计原理

⁰第一作者: 姓名: 杨舒婷; 性别: 女; 职称: 硕士; 研究生研究方向: 柔性传感器; 邮箱: 1301772281@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

离电型高灵敏度水听器的工作原理为：其电容值随压力变化可归因为两电极板间间距的变化以及介质层等效介电常数的变化。当传感器受到压力时，介质层的层状微结构和褶皱为传感器提供了可变形空间，上下电极板间的间距随压力发生变化。同时，由于介电层的介电常数大于层状微结构间隙中的空气的介电常数，当传感器受到压力时介质层中的空气被挤压，介电层取代了原来空气层的位置，介质层的等效介电常数变大。由于柔性电容式压力传感器是由两片涂覆氮化硼薄膜的离子膜面对面组装而成，因此在两片离子薄膜之间引入了空气层，在对传感器施加较小压力时，空气层首先被挤压；随着压力的增加，空气层被挤压完全后，离子薄膜表面的褶皱发生挤压，随后氮化硼纳米片之间发生挤压，无论是空气层的挤压还是纳米片之间的挤压都会改变柔性电容式压力传感器的几何形状和介质层等效介电常数，从而导致传感器的电容发生变化。柔性电容式压力传感器电容值的公式为：

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{d} \quad \text{公式 1}$$

式中，C 为传感器电容值； ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_r 为相对介电常数；S 为两电极板之间正对面积；d 为两电极板间的距离。可穿戴柔性电容式压力传感器的灵敏度公式为：

$$S = \frac{C - C_0}{P} \quad \text{公式 2}$$

式中：S 为可穿戴柔性电容式压力传感器的灵敏度；C 为电容值； C_0 为初始电容值；P 为压力。当向可穿戴柔性电容式压力传感器施加压力时，两平行板之间的距离 d 随之减小，传感器电容值增大。随着可穿戴传感器的逐步发展，可穿戴柔性电容式压力传感器的灵敏度受到设备尺寸的限制而下降。为了提升传感器的灵敏度，可选择具有低杨氏模量的柔性弹性体作为电容式传感器的介电层材料。此外，很多传感器在此基础上引入微结构来提升传感器的灵敏度。从公式 1 和公式 2 可知，具有微结构的电容式传感器能够提升灵敏度的原理主要有两个：

（1）从杨氏模量角度。具有微结构的电容式传感器在图案中存在空气，使得实际受力面积更小，等效杨氏模量减小，使得传感器在受力时发生更大的形变。（2）从介电层的相对介电常数角度。电容式传感器的微结构中存在空气，空气的相对常数低于介电层的相对介电常数，当具有微结构的电容式传感器被压缩时，微结构中的空气的体积损失了一部分，随着具有微结构的电容式传感器的两个电极板之间的距离减小，中间介电层有效介电常数增大。

3.2 设计方法

本作品的离电型高灵敏度水听器主要包括两个部分：离电型高灵敏度感知膜、PDMS 封装层。离电型高灵敏度感知膜主要包括以下六层：TPU 薄膜层、电极层、绝缘层、离子层、间隔层和敏感层，可使用不同的丝印板利用丝网印刷逐层印刷得到。其中，TPU 薄膜是承载其他各层的基底层，其具有优良的物理机械性能保证了水听器具有柔性可变性的机制；

电极层设计为 8×8 的阵列结构，电极线宽 0.5mm，通过丝网印刷印制在 TPU 薄膜上；绝缘层主要使用的材料是绝缘型印刷油墨，可避免阵列中单元之间的串扰；离子层的构成为：TPU+DFM+离子液体+h-BN 粉末，通过丝网印刷印至电极单元处，离子层是水听器能够接收到水声信号的关键；间隔层是使用 TPU 油墨印至电极单元周围构成，增加了电极单元与空气的空隙，即增加两电极板间距离，增大了初始电容，提高了传感器的灵敏度；敏感层为微型圆柱结构，采用丝网印刷印至电极单元上，敏感层的引入改变了水听器接受声波时的形态变化，提高了水听器的灵敏度。PDMS 封装层主要使用弹性体和固化剂按照 1：10 比例混合，倒至模具固化而得，可有效保护水听器感知膜在水下的状态。

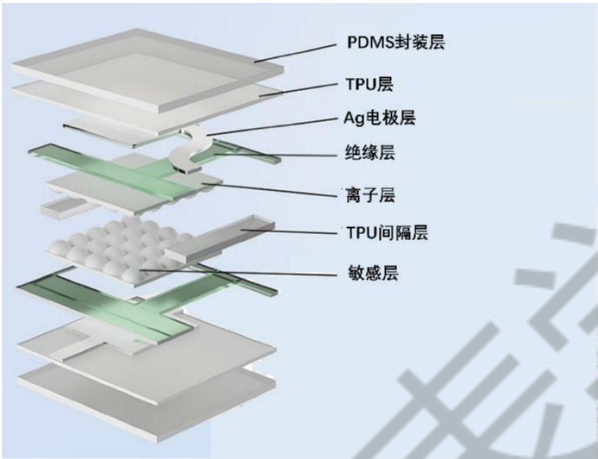


图 1 离电型水听器结构示意图

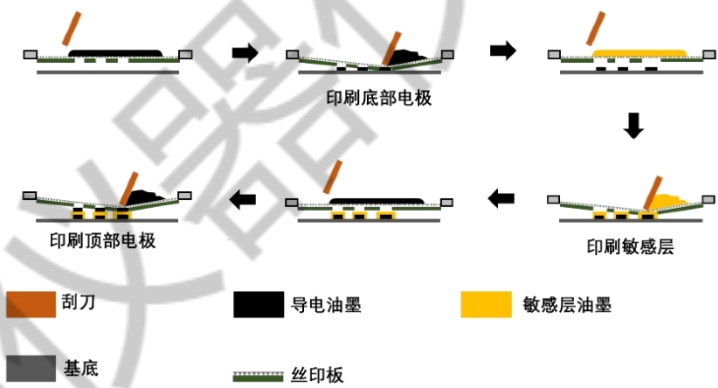


图 2 丝网印刷示意图

3.3 实验验证过程

本作品的高灵敏度离电型柔性水听器可以和水下物体表面进行曲面贴合，因此实验验证过程中需要模拟水下环境进行性能测试，主要包括以下过程：

- 1.准备实验环境：在实验室中放置一个透明水箱，并在其中放置柔性水听器的样品，同

时确保水箱内没有气泡或杂质。2.准备水声信号源：安装水下扬声器，以确保它在水中产生的声音可以覆盖整个水箱。3.校准设备：校准声音记录设备和信号发生器，以确保它们工作正常，并能提供准确的声音信号。4.测量水温 and 水质：使用水温计和水质检测仪器监测水的温度和质量。记录这些数据，因为它们可能影响柔性水听器性能。5.放置柔性水听器：将柔性水听器样品贴附到水箱内的适当位置，确保它们与水声信号源保持适当的距离。6.生成声音信号：使用信号发生器生成所需频率和振幅的声音信号，以模拟不同水声条件。可以逐步改变频率和振幅以进行多组实验。7.数据采集：启动声音记录设备，记录柔性水听器捕获的声音信号。记录所有实验参数，包括声音信号的特性和柔性水听器的位置。8.分析数据：使用数据采集卡将声音数据传输到计算机上，并使用数据分析软件进行处理和分析，可以进行频谱分析等。9.定位分析：使用水下定位设备，可以分析声音信号的到达时间以确定声源的位置，以验证柔性水听器在声源定位中的性能。