



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120333504 A

(43) 申请公布日 2025. 07. 18

(21) 申请号 202510489097.5

(22) 申请日 2025.04.18

(71) 申请人 浙江理工大学

地址 310000 浙江省杭州市江干区杭州经济开发区白杨街道

(72) 发明人 孙强 虞喆洋 曹文杰 路一洺
刘爱萍 程琳

(74) 专利代理机构 杭州敦和专利代理事务所
(普通合伙) 33296

专利代理师 冯海军

(51) Int. Cl.

G01D 5/241 (2006.01)

G01D 5/24 (2006.01)

权利要求书1页 说明书5页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器

(57) 摘要

本申请涉及基于仿生的电容式传感器结构领域,公开了一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,由上下电极层和功能层构成,所述上下电极层为一组一对四的阵列式极板结构,上极板为一块主极板,下极板为四块分极板;所述功能层分为三层顶部为含有四棱锥阵列微结构的PDMS/CNTs层,紧邻下方的是一块TPU薄膜,底部为含有梯度圆顶阵列微结构的PDMS/CNTs层,三个功能层垂直堆叠形成稳定的梯度互锁。所述电容式传感器参考了人皮肤真皮-表皮界面的结构,介质层特殊的形状使其比一般的电容式传感器拥有更高的灵敏度和更大的量程以及更平稳的数据输出。本发明实现了在有限面积上实现更大的受力面积,分散应力,有效降低单点过载压力,扩展测量范围。



1. 一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,其特征在于,包括上极板,介质层顶层,介质层中间层,介质层底层,下极板五部分;

所述介质层顶层为一片掺有碳纳米管(CNTs)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,其下表面具有一个 15×15 的四棱锥型微结构,单个微锥边长与高度之比为3:4,两个微锥之间的中心距离与高度之比为2:5;

所述介质层底层为同样的一片掺有碳纳米管(CNTs)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,其上表面具有一个 5×5 半球体组成的微结构,分别对不同区域的半球体微结构进行增高,中心的半球体与角上的四个半球体增高高度与半球体半径之比为 $8:3 \sim 3:1$,围绕着中心半球体的八个半球体增高高度与半球体半径之比为 $4:1 \sim 9:2$,余下的半球体增高高度与半球体半径之比为 $8:1 \sim 9:1$,两个半球体之间的中心距离与半径之比为115:300。

2. 根据权利要求1所述的一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,其特征在于,所述上极板为一块搭载有正方形的金属铜极板的柔性材料,作为电容器的上极板。

3. 根据权利要求1所述的一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,其特征在于,所述介质层中间层为一层tpu薄膜。

4. 根据权利要求1所述的一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,其特征在于,所述下极板为搭载有四块相同大小的正方形的铜极板的柔性材料,正好被上极板覆盖住。

5. 根据权利要求1所述的一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,其特征在于,包括:所述聚二甲基硅氧烷与碳纳米管复合薄膜制备过程,包括以下步骤:

S1. CNTs分散液制备:进行材料准备与初始混合阶段,通过超声波振荡将CNTs均匀分散于有机溶剂中,所述有机溶剂包括乙醇或甲苯;

S2. CNTs与PDMS共混处理:接下来,进入CNTs与PDMS的均匀混合阶段,将上述CNTs分散液与PDMS进行混合,并再次采用超声波处理技术,以促进CNTs在PDMS基体中的均匀分散;

S3. 去除有机溶剂:随后,在合适的温度下进行有机溶剂的去除,所述合适的温度具体为 $90-95^{\circ}\text{C}$;

S4. 固化剂调配混合:接着严格按照PDMS:固化剂为10:1的质量比例进行混合,以确保PDMS基体的均匀性和后续交联反应的完整性;

S5. 复合材料除泡处理:将固化剂搅拌均匀后,通过真空干燥技术,将混合物中的气泡彻底去除,得到均匀的PDMS-CNTs复合材料;

S6. 模具填充与二次除泡:进入成型与固化阶段,将上述均匀的PDMS-CNTs混合物倒入预先准备好的聚氨酯材质的四棱锥模具与梯度圆顶结构模具中,再次真空干燥以除去存在的气泡,保证成膜后的性能均匀;

S7. 薄膜固化脱模:随后,将模具置于特定温度下进行固化,所述特定温度具体为 $50-60^{\circ}\text{C}$,固化时间为1-2小时;固化完成后,小心地将薄膜从模具中取出;

S8. 传感器组装成型:进行组装步骤,将成型的PDMS-CNTs薄膜和tpu薄膜与上下极板采用叠层方式进行组装,即可获得柔性电容传感。

一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器

技术领域

[0001] 本发明涉及基于仿生的电容式传感器结构技术领域,具体为一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器。

背景技术

[0002] 近年来,传感器作为现代工业及智能化系统的核心感知器件,近年来在技术革新、应用拓展及市场规模方面均呈现出显著的发展态势。传感器行业正经历从单一感知向系统化智能化的跨越,技术创新与产业升级的双重驱动下,其在数字经济中的基石作用将进一步凸显。

[0003] 其中,电容式传感器的研究在技术创新和应用拓展方面取得显著进展,其核心发展方向聚焦于高精度、柔性化、集成化及智能化。目前,电容式传感器的研究方向大多着手于传感器的微型化与多功能集成以及对信号处理的优化,而忽略了探究介质层材料以及其结构设计对传感器输出结果的影响。

发明内容

[0004] 针对现有技术的不足,本发明提供了一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,通过模仿人类皮肤中真皮-表皮界面的三维互锁构造,扩展了传统的三明治叠层结构。在中间层引入两个微结构层,并在其间嵌入薄膜介电层以确保电容器的电绝缘性能。顶层采用四棱锥网格设计,而底层则是一个圆顶结构阵列。与单一微结构相比,这种互锁结构可以区分应力集中区域,拓宽动态响应范围,具有灵敏度高,量程大的特点。

[0005] 为实现以上目的,本发明通过以下技术方案予以实现:一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,包括上极板,介质层顶层,介质层中间层,介质层底层,下极板五部分;

[0006] 所述介质层顶层为一片掺有碳纳米管(CNTs)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,其下表面具有一个 15×15 的四棱锥型微结构,单个微锥边长与高度之比为 $3:4$,两个微锥之间的中心距离与高度之比为 $2:5$;

[0007] 所述介质层底层为同样的一片掺有碳纳米管(CNTs)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,其上表面具有一个 5×5 半球体组成的微结构,分别对不同区域的半球体微结构进行增高,中心的半球体与角上的四个半球体增高高度与半球体半径之比为 $8:3 \sim 3:1$,围绕着中心半球体的八个半球体增高高度与半球体半径之比为 $4:1 \sim 9:2$,余下的半球体增高高度与半球体半径之比为 $8:1 \sim 9:1$,两个半球体之间的中心距离与半径之比为 $115:300$ 。

[0008] 优选的,所述上极板为一块搭载有正方形的金属铜极板的柔性材料,作为电容器的上极板。

[0009] 优选的,所述介质层中间层为一层tpu薄膜。

[0010] 优选的,所述下极板为搭载有四块相同大小的正方形的铜极板的柔性材料,正好被上极板覆盖住。

- [0011] 优选的,所述聚二甲基硅氧烷与碳纳米管复合薄膜制备过程,包括以下步骤:
- [0012] S1. CNTs分散液制备:进行材料准备与初始混合阶段,通过超声波振荡将CNTs均匀分散于有机溶剂中,所述有机溶剂包括乙醇或甲苯;
- [0013] S2. CNTs与PDMS共混处理:接下来,进入CNTs与PDMS的均匀混合阶段,将上述CNTs分散液与PDMS进行混合,并再次采用超声波处理技术,以促进CNTs在PDMS基体中的均匀分散;
- [0014] S3. 去除有机溶剂:随后,在合适的温度下进行有机溶剂的去除,所述合适的温度具体为90-95°C;
- [0015] S4. 固化剂调配混合:接着严格按照PDMS:固化剂为10:1的质量比例进行混合,以确保PDMS基体的均匀性和后续交联反应的完整性;
- [0016] S5. 复合材料除泡处理:将固化剂搅拌均匀后,通过真空干燥技术,将混合物中的气泡彻底去除,得到均匀的PDMS-CNTs复合材料;
- [0017] S6. 模具填充与二次除泡:进入成型与固化阶段,将上述均匀的PDMS-CNTs混合物倒入预先准备好的聚氨酯材质的四棱锥模具与梯度圆顶结构模具中,再次真空干燥以除去存在的气泡,保证成膜后的性能均匀;
- [0018] S7. 薄膜固化脱模:随后,将模具置于特定温度下进行固化,所述特定温度具体为50-60°C,固化时间为1-2小时;固化完成后,小心地将薄膜从模具中取出;
- [0019] S8. 传感器组装成型:进行组装步骤,将成型的PDMS-CNTs薄膜和tpu薄膜与上下极板采用叠层方式进行组装,即可获得柔性电容传感器。

[0020] 本发明提供了一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器。具备以下有益效果:

[0021] 1、本发明实现了在有限面积上实现更大的受力面积,分散应力,有效降低单点过载压力,扩展测量范围。受章鱼触手的启发,与多级圆顶结构中调节圆顶半径的方法不同,在互锁结构中保持圆顶半径恒定的前提下,采用恒定圆顶半径的阵列排布的梯度化设计策略,间接构建了高度梯度差,从而实现了线性范围的显著扩展。这种设计中,确保了每个圆顶与四棱锥微结构的接触数量保持一致,保证了应力区域的逐级激活,相比非一致性圆顶结构设计,充分利用了四棱锥微结构层的微锥个数,从而增加了应力集中区域,提高灵敏度。

附图说明

- [0022] 图1为本发明的制备流程示意图;
- [0023] 图2为本发明的介质层顶层的四棱锥微结构示意图;
- [0024] 图3为本发明的四棱锥的具体尺寸信息示意图;
- [0025] 图4为本发明的介质层底层的半球形微结构示意图;
- [0026] 图5为本发明的半球形结构的具体尺寸信息示意图;
- [0027] 图6为本发明的传感器介质层侧视示意图;
- [0028] 图7为本发明的半球形结构加高示意图;
- [0029] 图8为本发明在实验过程中的一些性能数据示意图;
- [0030] 图9为本发明的柔性电容传感器结构示意图;

[0031] 图10为本发明中共构思了四种不同的梯度互锁微结构示意图。

具体实施方式

[0032] 下面将结合本发明说明书附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0033] 实施例:

[0034] 请参阅附图1-附图10,本发明实施例提供一种基于梯度互锁微结构的柔性电容式传感器,包括上极板,介质层顶层,介质层中间层,介质层底层,下极板五部分;

[0035] 上极板为一块搭载有正方形的金属铜极板的柔性材料,作为电容器的上极板。

[0036] 介质层顶层为一片掺有碳纳米管(CNTs)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,其下表面具有一个 15×15 的四棱锥型微结构,单个微锥边长与高度之比为3:4,两个微锥之间的中心距离与高度之比为2:5。

[0037] 介质层中间层为一层tpu薄膜。

[0038] 介质层底层为同样的一片掺有碳纳米管(CNTs)的聚二甲基硅氧烷(PDMS)薄膜,其上表面具有一个 5×5 半球体组成的微结构,分别对不同区域的半球体微结构进行增高,中心的半球体与角上的四个半球体增高高度与半球体半径之比为8:3~3:1,围绕着中心半球体的八个半球体增高高度与半球体半径之比为4:1~9:2,余下的半球体增高高度与半球体半径之比为8:1~9:1,两个半球体之间的中心距离与半径之比为115:300。

[0039] 下极板为搭载有四块相同大小的正方形的铜极板的柔性材料,正好被上极板覆盖住。

[0040] 介电层薄膜的材料选择需兼具优异的机械性能、电气性能、加工工艺性及与其他材料的兼容性。聚二甲基硅氧烷(PDMS)与碳纳米管(CNTs)的组合在此背景下脱颖而出。PDMS以其卓越的柔韧性和生物相容性著称,适合用于柔性电子器件并适应复杂表面和动态变形。CNTs则提供高导电性、导热性和机械强度,大比表面积还提升了传感器的灵敏度。两者结合,PDMS赋予材料柔韧性和生物相容性,CNTs则贡献导电性和机械强度。通过调整CNTs的含量,可以精确控制复合材料的导电性,满足不同应用需求。此外,该复合材料易于通过溶液加工或模具成型等方法制备,具有良好的可加工性和成本效益。

[0041] 聚二甲基硅氧烷(PDMS)与碳纳米管(CNTs)复合薄膜制备过程,包括以下步骤:

[0042] S1.CNTs分散液制备:进行材料准备与初始混合阶段,通过超声波振荡将CNTs均匀分散于有机溶剂中,所述有机溶剂包括乙醇或甲苯;

[0043] S2.CNTs与PDMS共混处理:接下来,进入CNTs与PDMS的均匀混合阶段,将上述CNTs分散液与PDMS进行混合,并再次采用超声波处理技术,以促进CNTs在PDMS基体中的均匀分散;

[0044] S3.去除有机溶剂:随后,在合适的温度下进行有机溶剂的去除,所述合适的温度具体为90-95℃;

[0045] S4.固化剂调配混合:接着严格按照PDMS:固化剂为10:1的质量比例进行混合,以确保PDMS基体的均匀性和后续交联反应的完整性;

[0046] S5. 复合材料除泡处理:将固化剂搅拌均匀后,通过真空干燥技术,将混合物中的气泡彻底去除,得到均匀的PDMS-CNTs复合材料;

[0047] S6. 模具填充与二次除泡:进入成型与固化阶段,将上述均匀的PDMS-CNTs混合物倒入预先准备好的聚氨酯材质的四棱锥模具和梯度圆顶结构模具中,再次真空干燥以除去存在的气泡,保证成膜后的性能均匀;

[0048] S7. 薄膜固化脱模:随后,将模具置于特定温度下进行固化,所述特定温度具体为50-60°C,固化时间为1-2小时;固化完成后,小心地将薄膜从模具中取出;

[0049] S8. 传感器组装成型:进行组装步骤,将成型的PDMS-CNTs薄膜和tpu薄膜与上下极板采用叠层方式进行组装,即可获得柔性电容传感器,如图9所示。

[0050] 本发明借鉴昆虫触角的尺度感知机制,利用不同高度的接触结构可实现材料类型识别、柔软度评估以及杨氏模量的精确量化。受章鱼触须吸盘结构的启发,研究表明不同尺寸的圆顶结构具有差异化的灵敏度和线性范围特征,通过将不同周期和直径的多级圆顶微结构进行优化组合,可在保持高灵敏度的同时显著提升线性范围。基于这些创新思路,本发明针对薄膜微结构限制以及传感面积与量程相互制约的技术瓶颈,在金字塔-圆形互锁结构的基础上,充分利用微结构应力集中区的可设计性和传感器响应范围的可控性,提出了一种梯度互锁微结构创新设计方案。本发明中共构思了四种不同的梯度互锁微结构(如图10所示),分别为同心圆梯度支撑,同心圆梯度分裂,三角波梯度以及菱形梯度,这几种梯度互锁结构能够大大改善传感器的弛豫时间,缩短响应时间,延缓形变饱和,降低初始电容,增大测量范围,提升抗干扰能力以及提高传感器稳定性。

[0051] 下面对本发明的工作状态进行详细说明:

[0052] 柔性电容式应变传感器由多通道传感阵列和含有梯度互锁微结构的PDMS/CNTs(聚二甲基硅氧烷/碳纳米管)薄膜组成,能高效获取物体表面的杨氏模量。如若按照章鱼触手的结构,在现有微锥分布密度下,大圆顶间隙引入次级小圆顶结构并不会形成新的有效应力集中区,反而会因微锥-圆顶空间失配导致信噪比下降。基于接触力学模型(赫兹接触理论)计算,材料的软硬程度(杨氏模量)需同时获取接触力和下压深度两个参数。引入高度梯度分布的圆顶结构后,梯度互锁结构能够同步获取接触力和下压深度数据,从而具备感知物体杨氏模量的能力,可以更好的区分软硬程度不同的物体,获取更多的感知信息。传感器中间层为功能层,是传感器的核心部分,负责感知外部刺激(如压力、应变等)并将其转换为电信号。根据下极板四个通道阵列各自电容变化趋势的不同可以检测到来自X、Y、Z三个轴的压力变化。传感器的电容大小可以用以下公式来描述:

$$[0053] \quad C = \frac{\epsilon A}{d}$$

[0054] 其中, ϵ 代表介电常数,A代表上下极板间重叠面积,d代表两极板间距离。当传感器受力应力作用后,两极板间距离d和上下极板间重叠面积发生变化,导致电容发生变化。根据电容式传感器相对电容的变化,就可以得到外力的大小和分布情况,从而分析外界信息,通过改进的iTransformer神经网络模型,解耦柔性电容式应变传感器的多通道电信号,精确提取接触力大小。

[0055] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换

和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

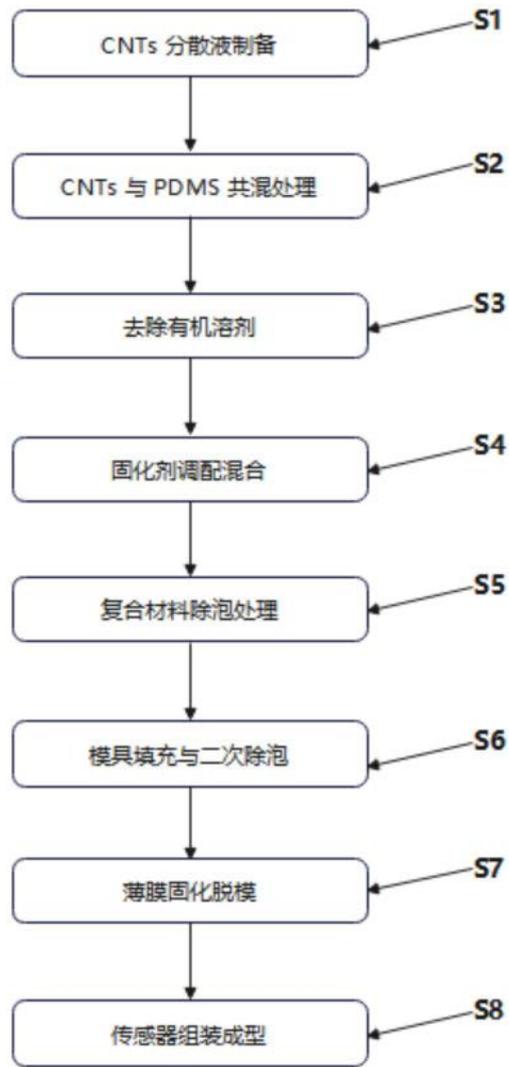


图1



图2

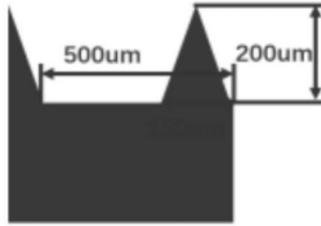


图3



图4

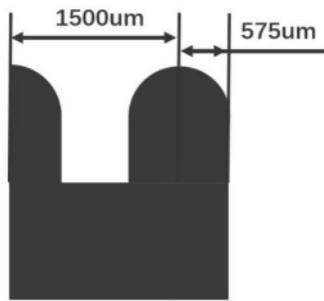


图5



图6

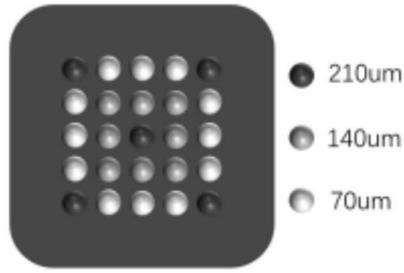


图7

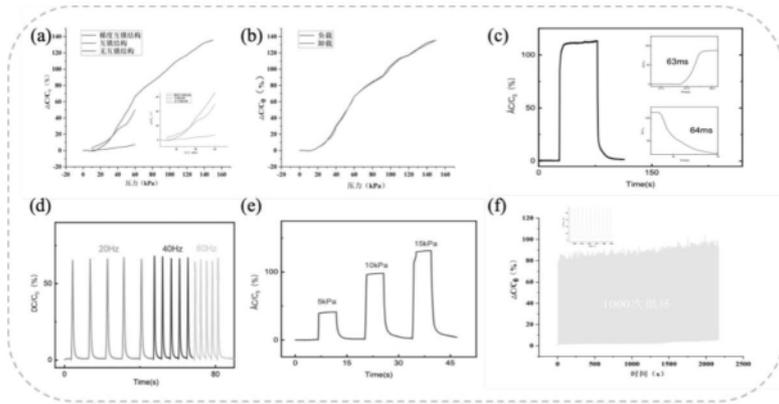


图8



图9

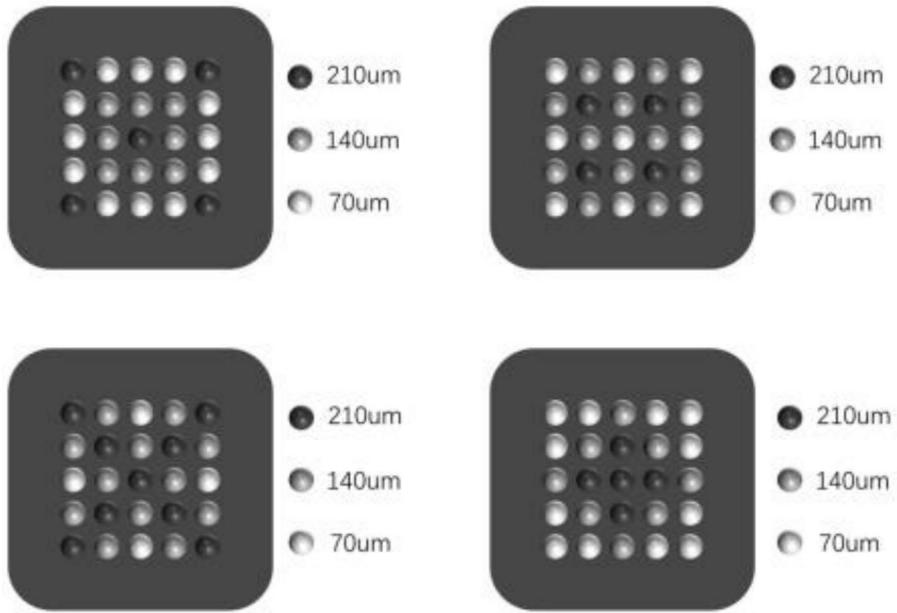


图10