



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103983382 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 06

(21) 申请号 201410245030. 9

(22) 申请日 2014. 06. 04

(73) 专利权人 合肥工业大学

地址 230009 安徽省合肥市包河区屯溪路
193 号

(72) 发明人 黄英 郭小辉 刘家俊 刘彩霞
袁海涛 马阳洋 刘平 张玉刚

(74) 专利代理机构 安徽省合肥新安专利代理有
限责任公司 34101

代理人 何梅生

(51) Int. Cl.

G01L 1/14(2006. 01)

审查员 潘景良

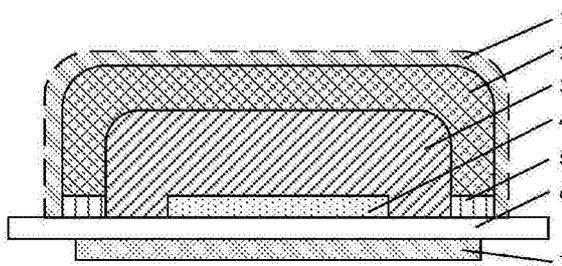
权利要求书1页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种全柔性电容式触觉传感器

(57) 摘要

本发明公开一种全柔性电容式触觉传感器，其特征在于：设置一柔性基底，在其下表面设置有屏蔽层，在其上表面设置有柔性导电下极板和间隔环绕在柔性导电下极板外围的柔性导电上极板电极；在柔性导电下极板和柔性导电上极板电极之间罩设有倒凹形弹性电介质层，在弹性电介质层外围罩设有倒凹形柔性导电上极板，在柔性导电上极板的外围罩设有倒凹形柔性保护层。本发明全柔性电容式触觉传感器所有结构均具有柔性，且将上下极板引线引至同一柔性基底，解决了阵列结构设计时出现引线繁琐、不美观、不易维护等难题。



1. 一种全柔性电容式触觉传感器,其是设置一柔性基底(6),其特征在于:在所述柔性基底(6)的下表面设置有屏蔽层(7),在所述柔性基底(6)的上表面设置有柔性导电下极板(4)和间隔环绕在所述柔性导电下极板(4)外围的柔性导电上极板电极(5);

在所述柔性导电下极板(4)和所述柔性导电上极板电极(5)之间罩设有倒凹形弹性电介质层(3),所述弹性电介质层(3)的凹槽底面贴合在所述柔性导电下极板(4)的上表面,所述弹性电介质层(3)的凸台嵌入在所述柔性导电下极板(4)和所述柔性导电上极板电极(5)之间;

在所述弹性电介质层(3)外围罩设有倒凹形柔性导电上极板(2),所述柔性导电上极板(2)的凸台顶面与所述柔性导电上极板电极(5)贴合,所述柔性导电上极板(2)的凹槽底面贴合在所述弹性电介质层(3)的上表面;

在所述柔性导电上极板(2)的外围罩设有倒凹形柔性保护层(1)。

2. 根据权利要求1所述的全柔性电容式触觉传感器,其特征在于:所述弹性电介质层(3)是以填充有炭黑的硅橡胶为材质,所述炭黑的质量百分比为5%~12%。

3. 根据权利要求1所述的全柔性电容式触觉传感器,其特征在于:所述柔性导电上极板(2)以有机硅导电银胶为材质。

4. 根据权利要求1所述的全柔性电容式触觉传感器,其特征在于:所述柔性基底(6)以聚酰亚胺为材质;所述柔性保护层(1)以PDMS为材质。

一种全柔性电容式触觉传感器

技术领域

[0001] 本发明属于传感技术领域,涉及一种用于人工智能皮肤的全柔性电容式触觉传感器。

背景技术

[0002] 触觉是智能机器人感知外界信息的一种有效途径,触觉信息感知是机器人传感技术领域一个必不可少的环节。一个完整的触觉信息是力、软硬度、温湿度及滑移等信息量的有机融合。作为一种仿生皮肤的触觉传感器被广泛应用于智能机器人触觉感知系统中,为智能机器人在复杂多元环境下完成预定功能提供了可靠保障。常用的机器人触觉传感器种类繁多,按敏感机理不同主要分为电阻式、电容式、光电式、压电式和电感式等。

[0003] Shouher Shirafuji 等人介绍了一种基于聚偏氟乙烯 (PVDF) 的柔性压电薄膜人工皮肤,安装于机械手内表面,经可靠抓取目标物实验,验证其具备触觉检测功能。然而 PVDF 只能检测动态力,缺乏对静态力的感知功能。意大利的 A. Cirillo 等人介绍了一种基于光电技术的人工皮肤,可以实现法向力与切向力的检测。上海交通大学微纳科学技术研究院微米 / 纳米加工技术重点实验室的何明轩等人介绍了一种基于 MEMS 工艺的电容式微触觉探头,可实现精密测量。慕尼黑工业大学的 Philipp Mittendorfer 在印刷电路板上设计了一种正六边形的触觉传感单元,可拼接成不同大小的“人工皮肤”,实现大面积触觉感知。通常这类触觉传感器用仿生皮肤时多采用刚性基体,缺乏应有的柔性,不适合在机器人弯曲表面广泛使用。

[0004] Takashi Sagisaka 等人提出了一种基于聚酰亚胺柔性基体的高密度触觉传感手套,用以检测外力分布、粗略估计力的方向及判别物体形状等。可灵活地穿戴于机器人手上实现触觉感知。然而,如果该高密度柔性触觉手套中某一部分发生破损则需要整体更换,势必加大使用成本,且可移植性与可维护性较差。

[0005] Kuniharu Takei 等人于美国科学院院报提出了一种基于碳纳米管和银纳米粒子复合膜的高灵敏度电子胡须,并在半球形基体安装 7 个电子胡须用以实现触觉感知。可是,在大量触觉单元排列成阵列结构时存在引线繁琐,不易大规模集成等问题。三星综合技术研究院的 Chwee-Lin Choong 等人介绍了一种高灵敏度、高可拉伸度的压阻式传感器,由于其压阻电极共用一柔性极板,限制了其阵列化结构设计。

[0006] 电容式传感器因具有体积小、灵敏度高、低噪声、低温漂及低功耗等显著优点而得到广泛应用。对于用作人工智能皮肤的触觉传感器不仅具有低成本、结构简单、稳定性高、抗干扰性强等特点外,还具备全柔性、可穿戴性、可扩展性、易维护性等特点。尤其是在服务和医疗机器人领域,这类智能机器人与人们生活密切相关,需要穿戴一些仿生皮肤确保安全人机交互。为此一种具有全柔性、可穿戴性强、可移植性好、易于维护、可拼接式的人工智能皮肤无疑是机器人传感技术领域的热点。

发明内容

[0007] 本发明是为避免上述现有技术所存在的不足之处,提供一种全柔性电容式触觉传感器,旨在解决现有全柔性电容式触觉传感器量程与灵敏度不可调、抗干扰性差、不易阵列化等问题。

[0008] 本发明为解决技术问题采用如下技术方案:

[0009] 本发明全柔性电容式触觉传感器,其特点在于:设置一柔性基底,在其下表面设置有屏蔽层,在其上表面设置有柔性导电下极板和间隔环绕在所述柔性导电下极板外围的柔性导电上极板电极;

[0010] 在所述柔性导电下极板和所述柔性导电上极板电极之间罩设有倒凹形弹性电介质层,所述弹性电介质层的凹槽底面贴合在所述柔性导电下极板的上表面,所述弹性电介质层的凸台嵌入在所述柔性导电下极板和所述柔性导电上极板电极之间,且凸台顶面贴合柔性基底;

[0011] 在所述弹性电介质层外围罩设有倒凹形柔性导电上极板,所述柔性导电上极板的凸台顶面与所述柔性导电上极板电极贴合,所述柔性导电上极板的凹槽底面贴合在所述弹性电介质层的上表面;

[0012] 在所述柔性导电上极板的外围罩设有倒凹形柔性保护层。

[0013] 本发明全柔性电容式触觉传感器,其特征在于:所述弹性电介质层是以填充有炭黑的硅橡胶为材质,所述炭黑的质量百分比为 5%~12%。

[0014] 所述柔性导电上极板以有机硅导电银胶为材质。

[0015] 所述柔性基底以聚酰亚胺为材质;所述柔性保护层以 PDMS 为材质。

[0016] 本发明全柔性电容式触觉传感器的结构模型可等效为平行板电容,弹性电介质层被柔性导电上极板和柔性保护层逐层包裹,凹槽底面与柔性导电下极板贴合。全柔性电容式触觉传感器的柔性导电上极板电极与柔性导电下极板的引线设计在同一聚酰亚胺柔性基底,可灵活进行电极布线,便于阵列化结构设计。

[0017] 呈倒凹形的柔性导电上极板的底面与柔性导电下极板平行,且通过以其凸台与接地的柔性导电上极板电极接触的形式实现接地的效果,作为触觉传感器的接地上极板,同时又起到屏蔽的作用,简化了电容式触觉传感器抗屏蔽措施。

[0018] 与已有技术相比,本发明有益效果体现在:

[0019] 1、本发明全柔性电容式触觉传感器所有结构均具有柔性,与传统电容式触觉传感器相比,本发明的全柔性电容式触觉传感器结构将平行板电容上下极板引线设计在同一柔性基底,解决了阵列结构设计时出现引线繁琐、不美观、不易维护等难题;同时,在聚酰亚胺柔性基底上将本发明全柔性电容式触觉传感器排列成阵列结构,并在阵列周围预留可拼接式阵列扩展接口,可通过 FPC 软排线较灵活地拼接成不同大小与形状敏感“皮肤”,具备可穿戴性、可扩展性、可移植性及易维护等特点。

[0020] 2、本发明全柔性电容式触觉传感器呈倒凹形的柔性导电上极板的底面与柔性导电下极板平行部分作为平行板电容上极板,其余部分作为柔性导电上极板引线并与接地的柔性导电上极板电极接触,其中,整个柔性导电上极板又承担屏蔽保护作用;传统电容式传感器抗屏蔽措施多是在传感器封装时在外围增设一金属壳作为接地屏蔽体,在一定程度上影响了整个传感器的全柔性;本发明全柔性电容式触觉传感器结构中柔性导电上极板本身具有屏蔽功能,简化了工艺流程,提高了传感器的抗干扰性能。

[0021] 3、本发明全柔性电容式触觉传感器通过调节弹性电介质中炭黑的含量来调控其介电常数,实现了电容式触觉传感器的量程与灵敏度、响应时间等性能的控制,具有较广的应用领域。

附图说明

- [0022] 图 1 是本发明全柔性电容式触觉传感器的垂直剖面结构图；
- [0023] 图 2 是本发明圆形结构的全柔性电容式触觉传感器的拆分立体图；
- [0024] 图 3 是本发明圆形结构不含保护层和屏蔽层的全柔性电容式触觉传感器的立体图；
- [0025] 图 4 是本发明方形结构的全柔性电容式触觉传感器的拆分立体图；
- [0026] 图 5 是本发明方形结构不含保护层与屏蔽层的全柔性电容式触觉传感器的立体图；
- [0027] 图 6 是本发明全柔性电容式触觉传感器的受力分析示意图；
- [0028] 图 7 是本发明全柔性电容式触觉传感器的附尺寸参数的实例图；
- [0029] 图 8 是本发明不同炭黑含量填充硅橡胶时全柔性电容式触觉传感器的灵敏度曲线关系；
- [0030] 图 9 是本发明不同炭黑含量填充硅橡胶时全柔性电容式触觉传感器的量程曲线关系；
- [0031] 图 10 是本发明不同炭黑含量填充硅橡胶时全柔性电容式触觉传感器响应时间；
- [0032] 图 11 是本发明炭黑质量分数为 8% 含量填充硅橡胶时全柔性电容式触觉传感器响应时间整体图；
- [0033] 图 12 是本发明全柔性电容式触觉传感器阵列结构示意图；
- [0034] 图 13 是本发明全柔性电容式触觉传感器的阵列引线示意图；
- [0035] 图中标号：1 柔性保护层；2 柔性导电上极板；3 弹性电介质层；4 柔性导电下极板；5 柔性导电上极板电极；6 柔性基底；7 屏蔽层；8 全柔性电容式触觉传感器；9 可拼接式阵列扩展插座；10 第一行扫描线；11 第一列扫描线。

具体实施方式

[0036] 如图 1 所示,本实施例全柔性电容式触觉传感器的结构为:设置一柔性基底 6,在其下表面设置有屏蔽层 7,在其上表面设置有柔性导电下极板 4 和间隔环绕在柔性导电下极板 4 外围的柔性导电上极板电极 5；

[0037] 在柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 之间罩设有倒凹形弹性电介质层 3,弹性电介质层 3 的凹槽底面贴合在柔性导电下极板 4 的上表面,弹性电介质层 3 的凸台嵌入在柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 之间；

[0038] 在弹性电介质层 3 外围罩设有倒凹形柔性导电上极板 2,柔性导电上极板 2 的凸台顶面与柔性导电上极板电极 5 贴合,柔性导电上极板 2 的凹槽底面贴合在所述弹性电介质层 3 的上表面;在柔性导电上极板 2 的外围罩设有倒凹形柔性保护层 1。

[0039] 弹性电介质层 3 依次被柔性导电上极板 2 和柔性保护层 1 逐层包裹,底部与柔性导电下极板 4 接触,构成一个模型可等效为平行板电容的压力敏感单元。本实施例的柔性

导电上极板 2 与柔性导电下极板 4 的引线引至同一柔性基底 6, 易于阵列化结构设计。

[0040] 柔性导电上极板 2 与柔性导电下极板 4 平行的部分充当平行板电容上极板, 其余部分充当导线将柔性导电上极板 2 与柔性导电上极板电极 5 连接, 柔性导电上极板电极 5 接地, 使得柔性导电上极板 2 整体起到屏蔽作用。在柔性基底 6 底层设有屏蔽层 7, 作为电容式传感器的屏蔽层。

[0041] 基于柔性印刷电路板 (FPCB) 技术, 柔性基底 6 选用聚酰亚胺, 柔性导电下电极板 4 与柔性导电上极板电极 5 均在柔性基底 6 的顶层并开窗处理, 其形状可以是圆形、方形等, 分别如图 2 中柔性导电下电极板 4、柔性导电上极板电极 5 和图 4 中柔性导电下电极板 4、柔性导电上极板电极 5 所示。

[0042] 弹性电介质层 3 选用瑞士 SPC 公司的 CB3100 型炭黑填充中昊晨光化工研究院有限公司的 GD401 型硅橡胶作为全柔性电容式触觉传感器的电介质材料, 其中, 为保证传感器的灵敏度, 炭黑的质量分数在 5%~12%, 保证在“渗流区”附近, 以便受力时利用介电性能随导电粒子含量的变化产生的“渗流效应”, 改变复合材料的导电性并提高介电常数。制备时主要采用 3D 打印技术。首先, 打印出高度适中的模具, 将炭黑均匀填充硅橡胶后注入模具成型, 待材料固化后取出即可。

[0043] 柔性导电上极板 2 基材需要具备良好的导电性与柔软性, 在一定程度上具备可延展性。本发明选用南京喜力特胶粘剂有限公司的 YC-02 型有机硅导电银胶作为柔性导电上极板 2 的材料, YC-02 型有机硅导电银胶甲、乙组分按质量比 10:1 均匀混合后室温下可自行固化, 且固化后具有良好的导电性、可拉伸性及柔软性等优点。

[0044] 柔性导电上极板 2 制备方法为: 首先, 按照制备弹性电介质层 3 模具方法, 打印出一内径与柔性导电上极板电极 5 外径相同的模具, 其高度略高出弹性电介质层 3, 以便在后续步骤注入有机硅导电银胶时能可靠覆盖弹性电介质层 3。将模具罩在柔性导电上极板电极 5 电极外, 将弹性电介质层 3 的凹槽底面贴合在柔性导电下极板 4 表面, 并置于模具中心。然后, 将配比好的有机硅导电银胶注入模具内, 并覆盖弹性电介质层 3。在此过程中保证柔性导电上极板 2 的凹槽底面与弹性电介质层 3 良好接触, 柔性导电上极板 2 的凸台顶面与柔性导电上极板电极 5 良好接触。否则在柔性导电上极板 2 和柔性导电下极板 4 之间的电介质就非仅含炭黑填充硅橡胶制备的弹性电介质, 可能会掺入空气介质等。待有机硅导电银胶固化后去除模具可获得一平行板结构模型的电容式压力敏感单元。并且, 柔性导电上极板 2 和柔性导电下极板 4 电极引线分布在同一柔性基底 6。

[0045] 为了延长该全柔性电容式触觉传感器的使用寿命, 仿照上述柔性导电上极板 2 制作工艺在柔性导电上极板层外围包裹一层 PDMS 保护层。

[0046] 如图 2 和图 4 所示, 全柔性电容式触觉传感器的柔性保护层 1、柔性导电上极板 2、弹性电介质层 3、柔性导电下极板 4、柔性导电上极板电极 5、柔性基底 6 及屏蔽层 7, 其形状可以是圆形、方形、椭圆形或其他多边形, 视应用场合而定。

[0047] 不含保护层和屏蔽层的圆形和方形的全柔性电容式触觉传感器的立体图分别如图 3 和图 5 所示, 倒凹形弹性电介质层 3 的凹槽底面与柔性导电下极板 4 接触, 在柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 之间有一定绝缘间距, 防止柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 短接。弹性电介质层 3 的凸台嵌入在柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 之间。倒凹形柔性导电上极板 2 包裹弹性电介质层 3, 其凸台与柔性导电上极板电极

5 接触。

[0048] 如图 6 所示(图 6 中虚轮廓线表示电容式触觉传感器未受压力时形状,实轮廓线表示受力后的形状),本实施例全柔性电容式触觉传感器检测触觉力的机理如下:全柔性电容式触觉传感器受法向力 F 作用时,弹性电介质层 3 被压缩其厚度改变,柔性导电上极板 2 和柔性导电下极板 4 之间距离减小,相当于平行板电容极板间距减小。同时,单位体积弹性电介质 3 中炭黑含量增加,导电炭黑粒子间相互接触机率逐渐上升,开始形成导电通路,促使弹性电介质层 3 的介电常数增加,最终表现为电容式触觉传感器的输出电容变大。

[0049] 起始阶段,施加法向力 F 较小,大部分炭黑粒子间彼此孤立,主要靠隧道效应和场致发射效应改变导电性能,弹性电介质层 3 的介电常数变化不明显,柔性导电上极板 2 和柔性导电下极板 4 之间间距的变化对电容式触觉传感器的输出起主导作用。随着法向力 F 的增加,由于弹性电介质层 3 本身厚度较薄且压缩量有限,此时柔性导电上极板 2 和柔性导电下极板 4 之间间距变化较小,而炭黑含量处于“渗流区”内,其介电常数的变化对传感器的输出起主导作用。

[0050] 在传感器尺寸参数不变时,可以通过调节炭黑在硅橡胶中的填充量控制该全柔性电容式触觉传感器的弹性电介质层 3 的介电系数,从而制备出不同量程与灵敏度的触觉传感器。

[0051] 由于柔性导电上极板层接地,具有很好的屏蔽作用,该单电极结构的全柔性电容式触觉传感器输出可以采用 AD 公司的 AD7747 或 AD7147 电容数字处理芯片。

[0052] 本发明全柔性电容式触觉传感器在信号提取时选用具备 I2C 兼容型串行接口与片内环境自校准功能的 AD7147-1,高达 16 位 CDC 精度,13 路容性输入的 AD7147-1 配合四通道单刀双掷开关 ADG734 可较方便地构成电容阵列传感器信号采集系统。同时,芯片采用有源交流屏蔽技术,将此屏蔽信号输出端与电容式触觉传感器的屏蔽层 7 相连,可有效地降低传感器使用过程中存在的噪声干扰。

[0053] 在传感器的量程范围内,使用精密拉压力计对所述结构的电容式触觉传感器重复进行加载实验,可以得到输入(法向力)与电容传感器输出电容之间的曲线关系。通过对输入(法向力)与输出电容之间的曲线关系进行拟合,得到输入(法向力)与电容式触觉传感器输出电容的定量函数关系,依据该函数关系及当前电容式触觉传感器的输出电容可反演出法向力 F 的大小,从而实现触觉力检测的目的。

[0054] 本发明全柔性电容式触觉传感器中,通过调控弹性电介质层中炭黑的含量可以实现传感器灵敏度、量程和响应时间的调控,为测试其具体影响,做实例如下:

[0055] 如图 7 所示,在实例中,柔性印刷电路板采用沉金工艺,外表敷黄油处理。柔性基底 6 是厚度为 0.15mm 的聚酰亚胺,柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 均是厚度为 0.15mm 的铜箔,一般在理论公式计算或仿真时该厚度是可忽略的。圆饼状柔性导电下极板 4 直径为 3mm,柔性导电上极板电极 5 圆环环径为 0.5mm,柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 间隔宽度为 1mm。弹性电介质层 3 的凹槽槽深 0.15mm(即柔性基底 6 顶层铜箔厚度),凹槽底部厚度为 1.5mm,总厚度为 1.65mm、外径为 5mm;柔性导电上极板 2 总厚度为 2.0mm、凹槽槽深为 1.5mm,外径为 6mm;柔性保护层 1 半径为 3.2mm、厚度为 0.2mm。

[0056] 在保持电容式触觉传感器尺寸不变情况下,控制炭黑填充硅橡胶的质量分数,探求不同炭黑含量下与电容式触觉传感器的灵敏度、量程和响应时间的关系。本实例中选择

炭黑质量分数分别为 5%、8%、10%、12%，使用 AIKOH MODEL-762 型压力计对电容式压力敏感单元进行重复加卸载实验，选用 AD7147-1CDC (Capacitance-to-Digital Converter) 作为电容信号采集的主芯片，STM32F103VET6 高性能微处理器作为电容信号采集与处理的主控芯片，建立电容信号采集与处理系统。

[0057] 针对不同炭黑含量对电容式触觉传感器灵敏度的调控，具体实施如下：在 0 ~ 600KPa 范围内，用 AIKOH MODEL-762 型压力计以 0.2N 为步进对电容式触觉传感器进行加压（本实例中已将压力 F 换算成压强值 P， $P = F/S$ ，其中， $S = \pi r^2$ 为电容式触觉传感器柔性导电下极板 4 的面积，r 为柔性导电下极板 4 的半径），同时，电容信号采集与处理系统测量对应施加压力下传感器的输出电容值。得到不同质量分数的炭黑填充硅橡胶时全柔性电容式触觉传感器归一化后的输入（压强）—输出（电容）之间的曲线关系如图 8 所示，图 8 中纵坐标 C 表示当前电容式触觉传感器的输出， C_0 为该触感器未受力时的初始输出电容值。可以明显看出，不同质量分数的炭黑填充硅橡胶时其灵敏度不同。在 0 ~ 600KPa 范围内对炭黑质量分数分别为 5%、8%、10%、12% 的四个未归一化的曲线关系进行二次多项式拟合，若分别用 $Y_{5wt\%}$ 、 $Y_{8wt\%}$ 、 $Y_{10wt\%}$ 、 $Y_{12wt\%}$ 、表示炭黑质量分数为 5%、8%、10%、12% 时的传感器输出值（单位：pF），x 表示对输入（压强值，单位：KPa），其二次多项式拟合后的函数关系如下：

$$[0058] \quad Y_{5wt\%} = 1.36392 + 0.00189 * x - 1.20632 * 10^{-6} * x^2$$

$$[0059] \quad Y_{8wt\%} = 1.36551 + 0.00255 * x - 1.75747 * 10^{-6} * x^2$$

$$[0060] \quad Y_{10wt\%} = 1.38553 + 0.00219 * x - 1.48582 * 10^{-6} * x^2$$

$$[0061] \quad Y_{12wt\%} = 1.40252 + 0.00233 * x - 1.54415 * 10^{-6} * x^2$$

[0062] 由于采用二次多项式拟合，本实例中电容式触觉传感器的灵敏度与输入 x（压强值）有关，若灵敏度单位选择 fF/KPa 时，不同炭黑含量下电容式触觉传感器输出函数对输入 x（压强值）求导，得灵敏度分别为： $1.89 - 2.4126 * 10^{-3} x$ (fF/KPa)、 $2.55 - 3.5149 * 10^{-3} x$ (fF/KPa)、 $2.19 - 2.9716 * 10^{-3} x$ (fF/KPa)、 $2.33 - 3.0883 * 10^{-3} x$ (fF/KPa)。

[0063] 针对不同炭黑含量对电容式触觉传感器量程的调控，具体实施如下：按照灵敏度测试方法，用 AIKOH MODEL-762 型压力计对电容式触觉传感器进行加压，同时，电容信号采集与处理系统测量对应施加压力下传感器的输出电容值。得到不同质量分数的炭黑填充硅橡胶时全柔性电容式触觉传感器输入（压强）—输出（电容）之间的曲线关系如图 9 所示，可以看出不同炭黑含量下随着输入（压强）的增加，其输出电容趋势不同。例如，炭黑含量 12wt% 在 622KPa 以后便趋于平缓，炭黑含量 10wt% 在 877KPa 以后便趋于平缓，此后便不利于测量。针对该曲线关系，炭黑质量分数分别为 5%、8%、10%、12% 较合适的量程分别为：0 ~ 1415 (KPa)、0 ~ 1273 (KPa)、0 ~ 877 (KPa) 和 0 ~ 622 (KPa)。

[0064] 针对不同炭黑含量对电容式触觉传感器响应时间的影响，具体实施如下：将 100g 砝码分别置于炭黑质量分数在 5%、8%、10%、12% 的电容式触觉传感器上，同时，电容信号采集与处理系统采集放置砝码这一过程中传感器的输出电容值。得到响应时间 (s) 与输出电容之间的曲线关系如图 10 所示，从图 10 中可以看出不同炭黑含量下其响应时间有所不同。

[0065] 通过调控弹性电介质层中炭黑的含量可以实现传感器灵敏度、量程和响应时间的调控，炭黑质量分数在 5%、8%、10%、12% 时其灵敏度、量程和响应时间对比如表 1 所示，

从表 1 中可以看出,在保持电容式触觉传感器尺寸不变情况下,不同炭黑含量其灵敏度、量程与响应时间均有差异,可以根据实际应用场合选择合适的炭黑含量,以制备出灵敏度、量程、响应时间等满足需要的弹性电介质。

[0066] 表 1

	炭黑含量 (%)	灵敏度 (fF/KPa)	适合量程 (KPa)	响应时间 (ms)
	5	$1.89-2.4126*10^{-3}x$	0~1415	333
[0067]	8	$2.55-3.5149*10^{-3}x$	0~1273	239
	10	$2.19-2.9716*10^{-3}x$	0~877	260
	12	$2.33-3.0883*10^{-3}x$	0~622	393

[0068] 为进一步研究传感器的检测性能,针对炭黑质量分数为 8% 时,给出其响应特性曲线如图 11 所示,从图中可以看出,其上升时间为 239ms。在此含量下,对电容式触觉传感器进行了 10 组压力检测实验,其实验结果及误差如表 2 所示,从表 2 中可以看出该全柔性电容式触觉传感器具备良好的触觉感知功能。

[0069] 表 2

	实验次数	传感器输出 C/C_0	测量值 / KPa	实际值 / KPa	相对误差 / %
	1	1.0641	29.2	28.3	3.18
	2	1.1529	88.5	84.9	4.24
	3	1.2340	147.7	141.5	4.38
[0070]	4	1.3068	206.5	198.1	4.24
	5	1.3729	266.3	254.7	4.55
	6	1.4289	323.6	311.3	3.95
	7	1.4779	381.2	367.9	3.62
	8	1.5211	441.2	424.5	3.93
	9	1.5579	504.3	481.1	4.82
	10	1.5927	586.7	566	3.65

[0071] 本发明全柔性电容式触觉传感器将平行板电容上下极板引线设计在同一柔性基底,解决了阵列结构设计时出现引线繁琐、不美观、不易维护等难题。同时,在聚酰亚胺柔性基底上本发明全柔性电容式触觉传感器排列成阵列结构,并在阵列周围预留可拼接式阵列扩展接口,可通过 FPC 软排线较灵活地拼接成不同大小与形状敏感“皮肤”,具备可穿戴性、可扩展性、可移植性及易维护等特点。

[0072] 对于阵列结构的全柔性电容式触觉传感器制备,可于聚酰亚胺柔性基体上将电容式触觉传感单元设计成阵列结构。同时,在 3D 打印模具时同样打印成阵列结构的模具,仿照单个触觉单元制备方法分次整体成型。

[0073] 如图 12 所示,将本发明全柔性电容式触觉传感器 8 排列成阵列结构(以 12×12 触觉传感阵列为例)。在柔性基底 6 上设计 12×12 电容式触觉传感阵列,在柔性基底 6 的四周均预留可拼接式阵列扩展插座 9,通过 FPC 软排线可将单个阵列模块灵活、自由地拼接为不同面积、形状的仿生皮肤。倘若在实际应用中某一块人工皮肤发生破损或功能失常,可以很容易将该块人工皮肤“脱下”,移植新的“皮肤”。在某种程度上不仅降低了人工皮肤的使用成本,又提高了现场维护的效率。实现真正意义上的可穿戴、可移植、易维护等功能。

[0074] 将本发明全柔性电容式触觉传感器 8 排列成阵列结构时,其布线方式如图 13 所示(以 3×3 电容式触觉传感阵列为例),柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 在柔性基底 6(柔性基底为多层结构)同一面并构成行列阵列结构,其中阵列的相同行的柔性导电上极板电极 5 与对应行扫描线相连,柔性导电下极板 4 与对应列扫描线相连。例如, 3×3 电容式触觉传感阵列中第一行的柔性导电上极板电极 5 均与第一行扫描线 10 相连,第一列的柔性导电下极板 4 均与第一列扫描线 11 相连。电容式触觉阵列传感器的行扫描线用实线表示,列扫描线用虚线表示,分别在柔性基底 6 的顶层和其他层。柔性导电下极板 4 的引线通过通孔 12 引入到列扫描线的所在层,从而满足柔性导电下极板 4 和柔性导电上极板电极 5 引线均在同一柔性基底 6,大大简化了阵列化结构布线复杂度。

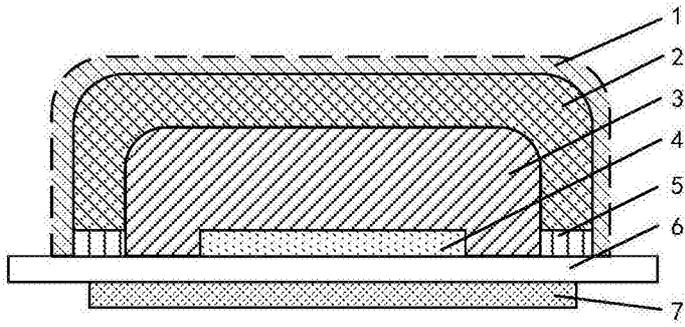


图 1

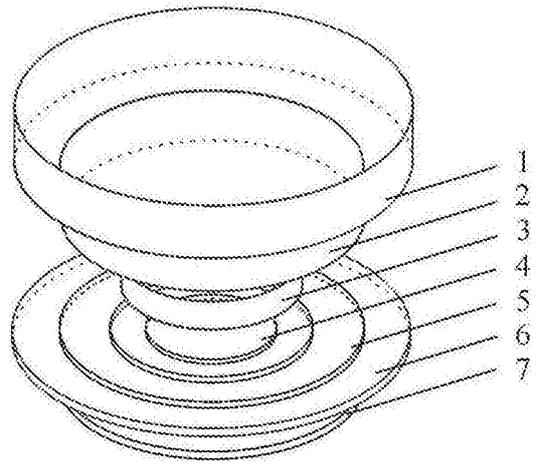


图 2

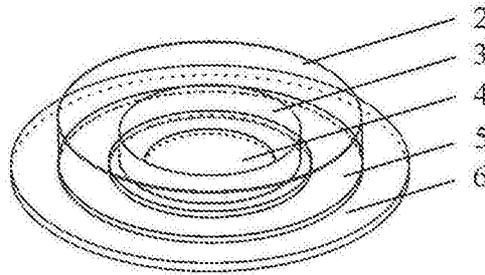


图 3

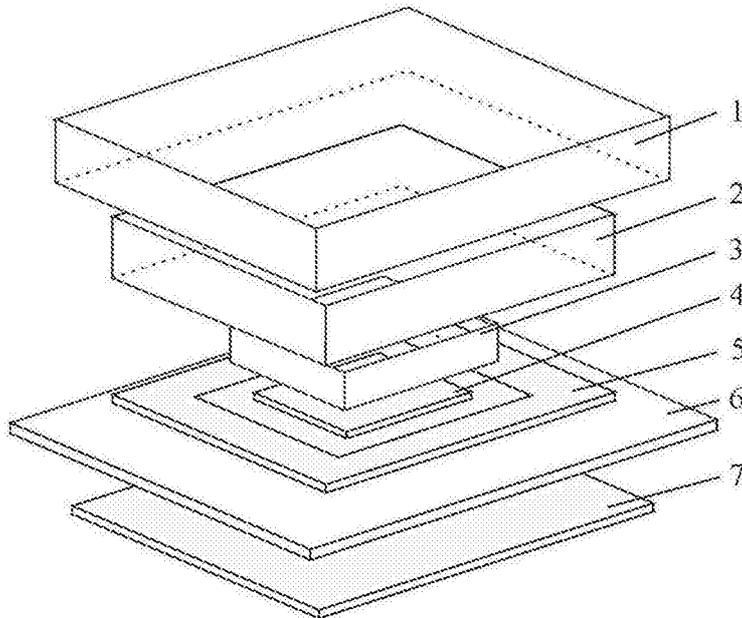


图 4

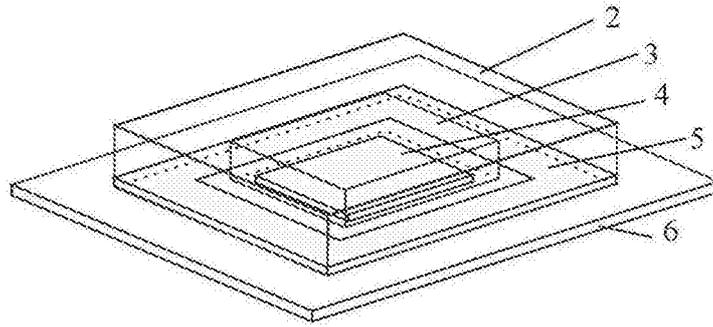


图 5

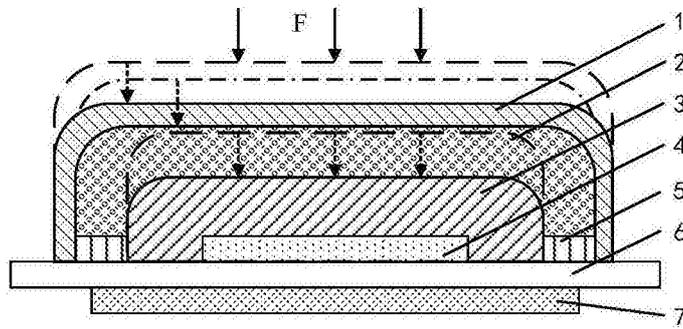


图 6

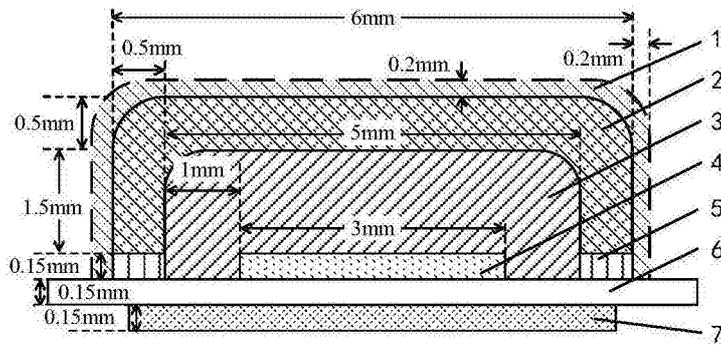


图 7

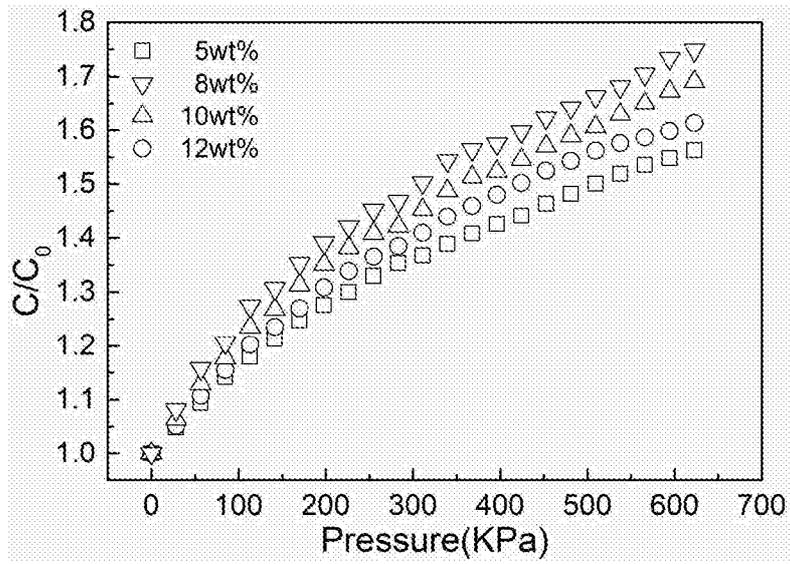


图 8

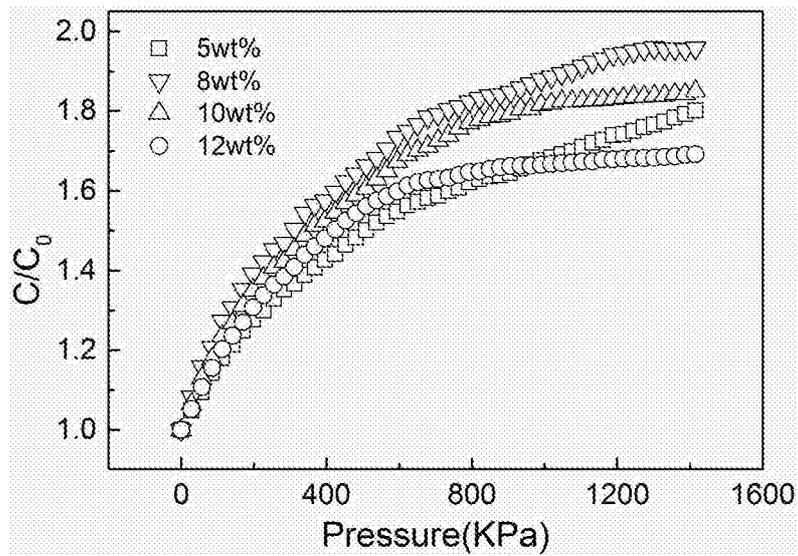


图 9

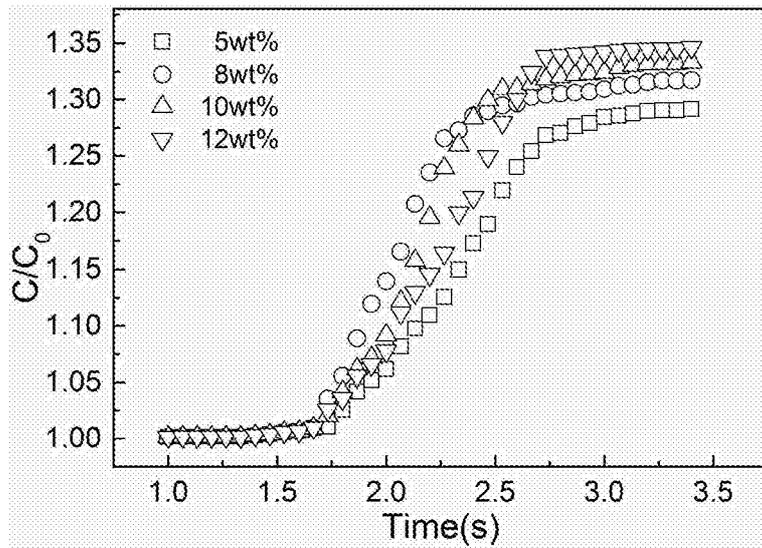


图 10

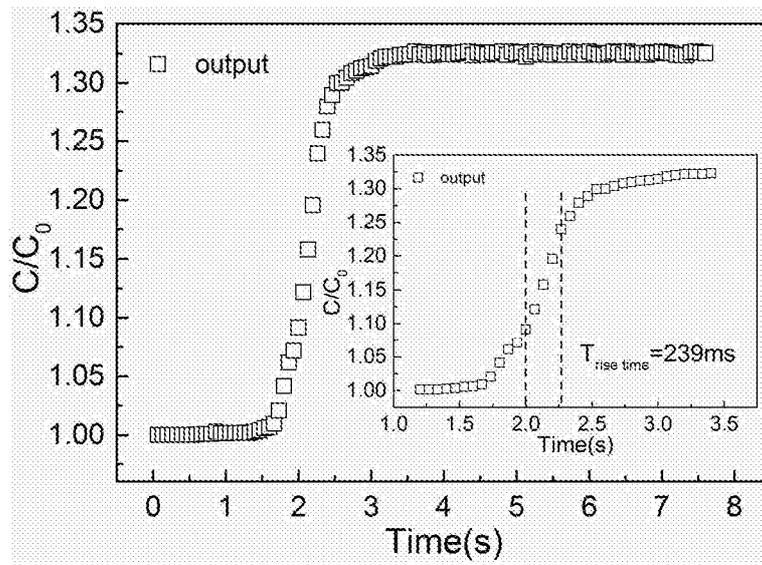


图 11

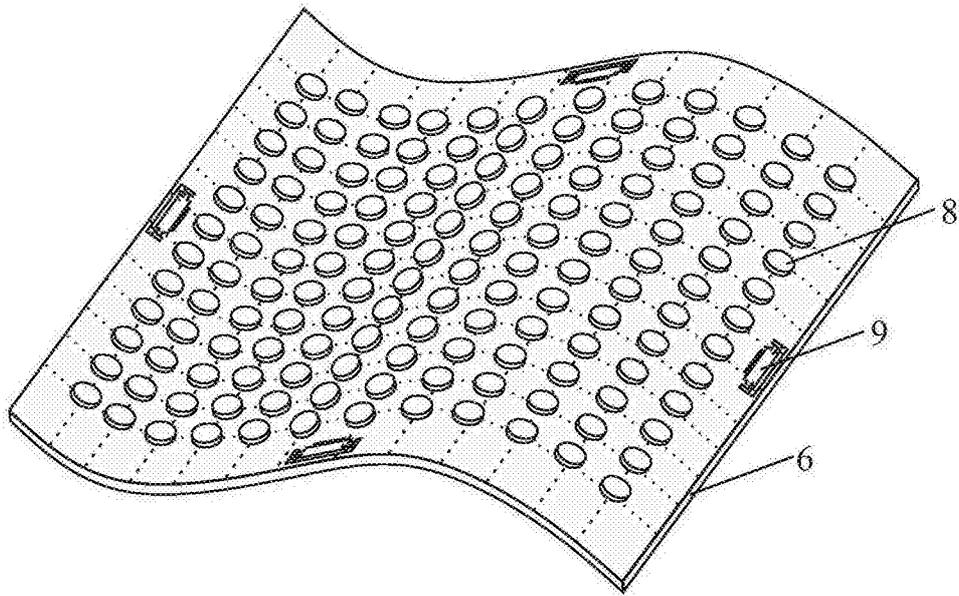


图 12

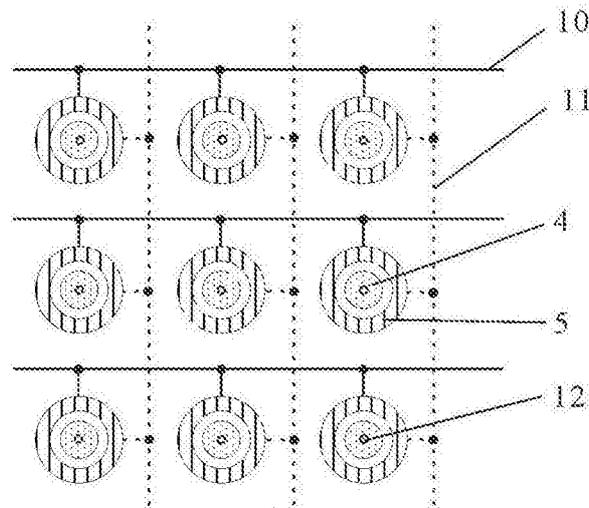


图 13