



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 105136369 A

(43) 申请公布日 2015. 12. 09

(21) 申请号 201510282590. 6

(22) 申请日 2015. 05. 28

(71) 申请人 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 汪卫华 汪月 何晓玥  
郭小辉 刘彩霞 刘平

(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 5/00(2006. 01)

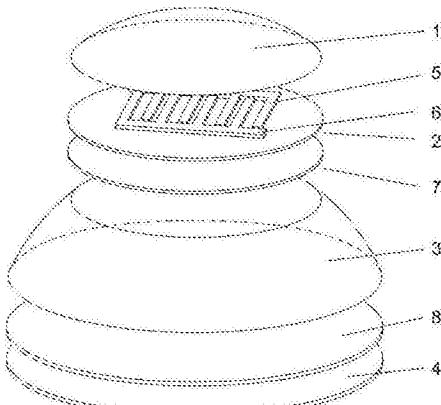
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种全柔性电阻式触压觉感知传感器及其制  
作方法

(57) 摘要

本发明公开一种全柔性电阻式触压觉感知传  
感器及其制作方法,其特征在于:在下柔性基底  
上通过层层组装技术形成有压觉感知传感器和  
触觉感知传感器;所述压觉感知传感器和所述触  
觉感知传感器之间通过上柔性基底连接,整体呈  
扁半球状;上层触觉感知传感器采用叉指电极结  
构,下层压觉感知传感器采用上下电极结构。本发  
明全柔性电阻式触压觉感知传感器能实现小量程  
段的触觉力和大量程段的压觉力的测量,保证了  
不同量程段测量的精度,且本发明的传感器的所  
有结构均具有柔性,将所有引线引至底部,避免了  
引线繁琐、不美观的现象。



1. 一种全柔性电阻式触压觉感知传感器，其特征在于：

所述全柔性电阻式触压觉感知传感器是在下柔性基底上，通过层层组装技术形成有压觉感知传感器和触觉感知传感器；所述压觉感知传感器和所述触觉感知传感器之间通过上柔性基底连接。

2. 根据权利要求 1 所述的全柔性电阻式触压觉感知传感器，其特征在于：

所述触觉感知传感器位于所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的上层，采用柔性叉指电极结构，以石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶为敏感材料，用于感知触觉力；

所述压觉感知传感器位于所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的下层，采用上下电极结构，以碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶为敏感材料，用于感知压觉力。

3. 根据权利要求 1 所述的全柔性电阻式触压觉感知传感器，其特征在于：所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的整体结构呈扁半球形。

4. 根据权利要求 3 所述的全柔性电阻式触压觉感知传感器，其特征在于：所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的信号线全部从整体扁半球结构内部通过，并从底部引出。

5. 根据权利要求 1 所述的全柔性电阻式触压觉感知传感器，其特征在于：所述下柔性基底和所述上柔性基底均以聚酰亚胺为材质。

6. 一种权利要求 1 ~ 5 中任意一项所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的制作方法，其特征在于按如下步骤进行：

(1) 设置圆形的上柔性基底 2 和圆形的下柔性基底 4，在所述上柔性基底 2 上设置过孔，在所述下柔性基底 4 的圆心处设置通孔；

(2) 在所述上柔性基底 2 的上表面蒸镀柔性叉指电极；在所述上柔性基底 2 的下表面蒸镀上圆形电极 7；在所述下柔性基底 4 的上表面蒸镀下圆形电极 8；

(3) 将石墨烯、炭黑及硅橡胶混合均匀后注入扁半球形模具后，将扁半球形模具放在上柔性基底 2 的上表面，使石墨烯、炭黑及硅橡胶的混合物与上柔性基底 2 的上表面紧密贴合，然后室温下硫化成型，取下扁半球形模具，即在上柔性基底 2 的上表面形成石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1，且石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 作为敏感材料与上柔性基底 2 的上表面的柔性叉指电极贴合，构成触觉感知传感器；

(4) 将碳纳米管、炭黑及硅橡胶混合均匀后注入中轴线处带有一细圆柱的圆台形模具，然后室温下硫化成型，取下圆台形模具，即获得中轴线处带有一细圆柱形通孔的圆台形碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3；

(5) 将碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 的一面通过导电银胶与上柔性基底 2 下表面的上圆形电极 7 粘接，另一面通过导电银胶与下柔性基底 4 下表面的下圆形电极 8 粘接，构成压觉感知传感器；

(6) 将柔性叉指电极的一侧 5 通过上柔性基底 2 上的过孔与上圆形电极 7 连接后，共同与公共信号线 9 相连，将柔性叉指电极的另一侧 6 与第一信号线 10 相连，将下圆形电极 8 与第二信号线 11 相连；

将公共信号线 9、第一信号线 10 和第二信号线 11 通过碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 中轴线处的细圆柱形通孔及下柔性基底 4 圆心处的通孔引出至下柔性基底 4 底部，用于与信号采集电路相连。

7. 根据权利要求 6 所述的制作方法，其特征在于：

步骤(3)中石墨烯和炭黑的总质量占硅橡胶质量的6%，石墨烯和炭黑的质量比为1:2。

8. 根据权利要求6所述的制作方法，其特征在于：

步骤(4)中碳纳米管和炭黑的总质量占硅橡胶质量的8%，碳纳米管和炭黑的质量比为2:3。

## 一种全柔性电阻式触压觉感知传感器及其制作方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于传感技术领域，涉及一种应用于人工智能皮肤的全柔性电阻式触压觉感知传感器。

### 背景技术

[0002] 人类感知外界力的系统是一个结构精巧的系统，人类皮肤对于作用于其上的应力，也即是机械刺激的感知，主要分为触觉和压觉。两者的感受器不同，触觉感受器是触觉小体（分布于真皮浅部的乳头层）和皮肤内围绕毛囊的神经末梢。压觉感受器是环层小体（分布于真皮深层的网状层）。触觉由轻微的不引起皮肤变形的刺激引起，压觉则是由能使皮肤发生变形的刺激引起。作为仿人类皮肤的机器人智能皮肤，外界力信息感知是一个必不可少的环节，机器人依靠分布于智能皮肤上的力敏传感器可以精确的感知外部信息，实现与外界环境的良好互动。

[0003] 目前国内外已经研制出多种用于机器人皮肤的外界力感知传感器。金属应变片、半导体压阻传感器等广泛用于压力检测，但由于其基于刚性材料，缺乏必要的柔性，不适合在机器人弯曲表面使用。电容式传感器应用于压力检测时，灵敏度较低，且电容信号容易受外界因素干扰。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，验证其具备力信息检测功能，然而基于压电特性的 PVDF 只能检测动态力，缺乏对静态力的感知功能。斯坦福大学鲍哲南教授研究小组对两电极间的柔性填充物进行了微结构改造，采用空心球微结构，能非常灵敏地检测外界压力，但只能检测  $0 \sim 10\text{kPa}$  小量程段的应力。Yangyong Wang 等人介绍了一种弹性基体内嵌可拉伸织物传感器方法，可以实现  $1\text{MPa}$  应力检测，但对于小量程段应力检测灵敏度和精度不足。

### 发明内容

[0004] 本发明是为避免上述现有技术所存在的不足之处，提出一种全柔性电阻式触压觉感知传感器，旨在提供一种用于智能机器人敏感皮肤的、兼具大小量程段力学量测定、全柔性、灵敏度高、性能稳定、制备工艺简单的力敏传感器。

[0005] 本发明为解决技术问题采用如下技术方案：

[0006] 本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器，其特点在于：

[0007] 所述全柔性电阻式触压觉感知传感器是在下柔性基底上，通过层层组装技术形成有压觉感知传感器和触觉感知传感器；所述压觉感知传感器和所述触觉感知传感器之间通过上柔性基底连接。

[0008] 所述触觉感知传感器位于所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的上层，采用柔性叉指电极结构，以石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶为敏感材料，用于感知触觉力；

[0009] 所述压觉感知传感器位于所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的下层，采用上下电极结构，以碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶为敏感材料，用于感知压觉力。

[0010] 所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的整体结构呈扁半球形。所述全柔性电阻式触压觉感知传感器的信号线全部从整体扁半球结构内部通过，并从底部引出。所述下柔性基底和所述上柔性基底均以聚酰亚胺为材质。

[0011] 上述全柔性电阻式触压觉感知传感器的制作方法是按如下步骤进行：

[0012] (1) 设置圆形的上柔性基底2和圆形的下柔性基底4，在所述上柔性基底2上设置过孔，在所述下柔性基底4的圆心处设置通孔；

[0013] (2) 在所述上柔性基底2的上表面蒸镀柔性叉指电极；在所述上柔性基底2的下表面蒸镀上圆形电极7；在所述下柔性基底4的上表面蒸镀下圆形电极8；

[0014] (3) 将石墨烯、炭黑及硅橡胶混合均匀后注入扁半球形模具后，将扁半球形模具放在上柔性基底2的上表面，使石墨烯、炭黑及硅橡胶的混合物与上柔性基底2的上表面紧密贴合，然后室温下硫化成型，取下扁半球形模具，即在上柔性基底2的上表面形成石墨烯/炭黑填充硅橡胶1，且石墨烯/炭黑填充硅橡胶1作为敏感材料与上柔性基底2的上表面的柔性叉指电极贴合，构成触觉感知传感器；

[0015] (4) 将碳纳米管、炭黑及硅橡胶混合均匀后注入中轴线处带有一细圆柱的圆台形模具，然后室温下硫化成型，取下圆台形模具，即获得中轴线处带有一细圆柱形通孔的圆台形碳纳米管/炭黑填充硅橡胶3；

[0016] (5) 将碳纳米管/炭黑填充硅橡胶3的一面通过导电银胶与上柔性基底2下表面上的上圆形电极7粘接，另一面通过导电银胶与下柔性基底4下表面上的下圆形电极8粘接，构成压觉感知传感器；

[0017] (6) 将柔性叉指电极的一侧5通过上柔性基底2上的过孔与上圆形电极7连接后，共同与公共信号线9相连，将柔性叉指电极的另一侧6与第一信号线10相连，将下圆形电极8与第二信号线11相连；

[0018] 将公共信号线9、第一信号线10和第二信号线11通过碳纳米管/炭黑填充硅橡胶3中轴线处的细圆柱形通孔及下柔性基底4圆心处的通孔引出至下柔性基底4底部，用于与信号采集电路相连。

[0019] 其中：步骤(3)中石墨烯和炭黑的总质量占硅橡胶质量的6%，石墨烯和炭黑的质量比为1:2。步骤(4)中碳纳米管和炭黑的总质量占硅橡胶质量的8%，碳纳米管和炭黑的质量比为2:3。

[0020] 与已有技术相比，本发明有益效果体现在：

[0021] 1、本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器与其它单一量程力敏传感器相比，既能实现小量程段(0~100KPa)的触觉力的感知，又能实现大量程段(>100KPa)的压觉力的测定，提高了小量程段力学量检测的分辨率和灵敏度，保证了不同量程段测量的精度。

[0022] 2、本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器整体呈扁半球形状，与一般上下等截面的结构相比，能够将顶部外界力均匀地传递到下方叉指电极上及下层的压觉感知传感器上，提高测量的准确性。

[0023] 3、本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器以聚酰亚胺为基底，传感器敏感材料和电极等所有结构均具有很好的柔性，传感器可实现弯曲变形，能可靠地贴合在机器人皮肤上，实现外界刺激的感知，提高了其表面适应性。

[0024] 4、本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器制备工艺简单；与一般上下电极结构的

力敏传感器引线上下分别引出的方式相比,本发明传感器所有引线统一从底部柔性基底下方引出,避免布线繁琐、不美观,便于阵列化结构设计。

## 附图说明

- [0025] 图 1 是本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器的垂直剖面结构图;
- [0026] 图 2 是本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器的拆分立体图;
- [0027] 图 3 是本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器的电极引线示意图;
- [0028] 图 4 是本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器的触觉感知小量程段电阻 - 应力关系曲线图;
- [0029] 图 5 是本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器的压觉感知大量程段电阻 - 应力关系曲线图;
- [0030] 图 6 是本发明全柔性电阻式触压觉感知传感器的信号采集、处理电路示意图;
- [0031] 图中标号 :1 石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 ;2 上柔性基底 ;3 碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 ;4 下柔性基底 ;5 柔性叉指电极的一侧 ;6 柔性叉指电极的另一侧 ;7 上圆形电极 ;8 下圆形电极 ;9 公共信号线 ;10 第一信号线 ;11 第二信号线。

## 具体实施方式

[0032] 如图 1 和图 2 所示,本实施例的全柔性电阻式触压觉感知传感器整体结构呈扁半球状,便于传感器各部分均匀感受外力,高度为 5mm,底部半径为 10mm,曲率半径为 12.5mm;包括上层用于感知小量程段外界力的触觉感知传感器和下层用于感知大量程段外界力的压觉感知传感器;

[0033] 触觉感知传感器以石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 作为敏感材料,采用同面叉指电极结构,上柔性基底 2 上表面的柔性叉指电极作为电极;

[0034] 压觉感知传感器包括碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 作为敏感材料,采用上下电极结构,上柔性基底 2 下表面的上圆形电极 7 和下柔性基底 4 上表面的下圆形电极 8 作为电极;

[0035] 基于柔性印刷电路板 (FPCB) 技术,上柔性基底 2 和下柔性基底 4 均选用聚酰亚胺为材质,如图 3 所示,上柔性基底上表面的柔性叉指电极的一侧 5 和上柔性基底下表面的上圆形电极 7 通过在上柔性基底 2 上设置过孔连接,共同与公共信号线 9 相连,上柔性基底上表面的柔性叉指电极的另一侧 6 与第一信号线 10 相连,下柔性基底上表面的下圆形电极 8 与第二信号线 11 相连。

[0036] 触觉感知传感器敏感材料石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 选用中国科学院成都有机化学有限公司的石墨烯和瑞士 SPC 公司的 CB3100 型炭黑作为混合导电填料,选用中昊晨光化工研究院有限公司的 GD401 型硅橡胶作为柔性基体。为保证传感器的灵敏度和稳定性,石墨烯 / 炭黑混合填料的质量分数为 6%,保证在“渗流区”附近,以便受力时利用导电粒子间距变化产生电阻的变化;且两者质量比为 1:2,保证填料分布均匀,形成稳定的力学结构,保证机械性能。石墨烯 / 炭黑和硅橡胶通过溶液共混法制备,利用 3D 打印技术打印出一扁半球形模具,将石墨烯 / 炭黑 / 硅橡胶注入扁半球形模具,并将上柔性基底 2 上表面与石墨烯 / 炭黑 / 硅橡胶混合物紧密贴合,并在室温下硫化成型,取出得到石墨烯 / 炭黑填充

硅橡胶 1，并能与上柔性基底 2 上表面的柔性叉指电极贴合，形状呈扁半球形，底部半径为 6.78mm，高度为 2cm。

[0037] 压觉感知传感器敏感材料碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 选用中国科学院成都有机化学有限公司的 TNM5 型碳纳米管和瑞士 SPC 公司的 CB3100 型炭黑作为混合导电填料，选用中昊晨光化工研究院有限公司的 GD401 型硅橡胶作为柔性基体，碳纳米管 / 炭黑混合填料的质量分数为 8%，两者质量比为 2:3。利用 3D 打印技术打印出中轴线处带有一细圆柱的圆台形模具，采用上述石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 类似制备工艺，得到碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3，形状呈圆台形，如图 3 所示，圆台中轴线处带有一细圆柱形通孔，便于引线通过，圆台顶部半径同石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 底部半径一致为 6.78mm，底部半径为 10mm，高度为 3mm。

[0038] 上述碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 上、下表面通过导电银胶分别与上柔性基底下表面的上圆形电极 7、下柔性基底上表面的下圆形电极 8 粘接。导电银胶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，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。

[0039] 如图 3 所示，公共信号线 9、第一信号线 10 和第二信号线 11 均采用柔软的细漆包铜线，表面有良好的绝缘层，均从碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 中轴线处的细圆柱形通孔及下柔性基底 4 圆心处的通孔引出至下柔性基底 4 底部，与信号采集电路相连。

[0040] 本实施例全柔性电阻式触压觉感知传感器的具体检测机理如下：传感器敏感材料石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 和碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3 均为导电粒子填充聚合物复合材料，导电粒子在聚合物内部互相“连接”形成导电网络，并形成稳定的力学结构，当不同大小的外界力作用在传感器顶端，敏感材料内部导电网络受到不同程度的影响，引起电阻的变化，经过信号处理电路，得到不同的输出信号，从而实现所受外界力大小的检测。

[0041] 上层触觉感知传感器用于感知小量程段外界力，采用同面叉指电极，敏感材料为石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1。叉指电极结构的设计可以减小初始电阻  $R_0$ ，叉指之间形成一个个电阻，整个可以等效为多个电阻的并联，电极中叉指数越多，则并联的电阻数越多， $R_0$  越小。由于采用同面叉指电极结构，受力时主要考虑石墨烯 / 炭黑填充硅橡胶 1 的表面压阻效应，体压阻效应的影响可以忽略。当外界力作用时，敏感材料受到挤压，叉指间敏感材料表面水平方向导电粒子形成的导电网络受到破坏，导致敏感材料电阻值增大，呈正压阻效应。电阻 - 应力关系曲线如图 4 所示，电阻随着应力增大而显著增大，且灵敏度高，线性度较好，能良好的感知小量程段的触觉力。灵敏度比同种材料的上下电极结构的传感器高，其归因于初始电阻较小，且呈正压阻效应，受外力作用时电阻相对变化量大；另外由于叉指电极在敏感材料硫化成型过程中与其紧密贴合，所以材料成型后电极接触良好，不会出现受到外力作用时，因电极接触面积变化而电阻减小的情况。当压力超过 100kPa 后，灵敏度降低，表面压阻效应逐渐趋于饱和。

[0042] 下层压觉感知传感器用于感知大量程段外界力，采用上下电极，敏感材料为碳纳米管 / 炭黑填充硅橡胶 3。当外界力作用时，敏感材料受到挤压，上下电极之间竖直方向导电粒子形成更多的有效导电网络，导致敏感材料电阻值减小，呈负压阻效应。电阻 - 应力关系曲线如图 5 所示，由于采用上下电极结构，导电网络受外力影响范围宽，电极间敏感材料

随外力形变大,且由于形变引起的应变效应和导电网络变化引起的压阻效应均导致电阻值下降,两者协同作用,使压觉感知传感器能感知大量程的外界力。

[0043] 上述上层触觉感知传感器能灵敏感知小量程段的外界应力,但对大量程段的力感知能力很弱;而下层压觉感知传感器对力敏感范围很宽,但无法满足小量程段外界应力的灵敏测量,且用于小量程段力值测量时误差偏大。为了实现小量程段的触觉力和大量程段的压觉力的测量,保证不同量程段测量的精度,本发明结合两种传感器的优势,利用信号处理电路分段获取、计算所测力值。

[0044] 图6为信号采集、处理电路示意图,触觉感知传感器和压觉感知传感器分别通过惠斯通电桥并校零,经过放大电路接入到模拟开关的1、2输入通道上,通过控制电路决定通道的选择,选通的一路信号经过滤波和A/D转换,并换算成对应力值,在上位机上显示。模拟开关通道的选择规则如下:将上层触觉感知传感器受100kPa外界力时的输出信号值设定为阈值 $V_1$ ,将下层压觉感知传感器受100kPa外界力时的输出信号值设定为阈值 $V_2$ ,当外界力在小量程触觉感知传感器能良好的感知范围内(0~100kPa),通道1设定为开,通道2设定为关,触觉感知传感器信号经过处理并输出;当外界力超过触觉感知传感器设定的感知范围,进入大量程段时,输出信号值超过阈值 $V_1$ ,通道1设定为关,通道2设定为开,压觉感知传感器开始工作;当外界力由大量程段变为小量程段时,输出信号值超过低于阈值 $V_2$ ,通道1设定为开,通道2设定为关,触觉感知传感器转为工作状态。

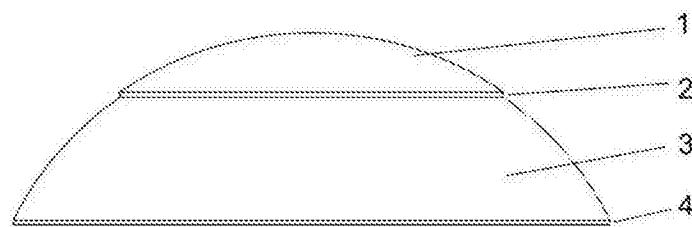


图 1

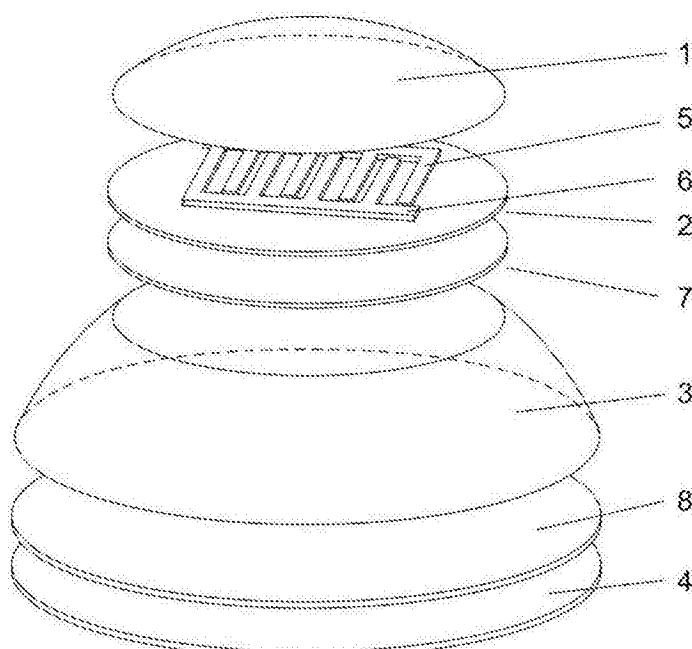


图 2

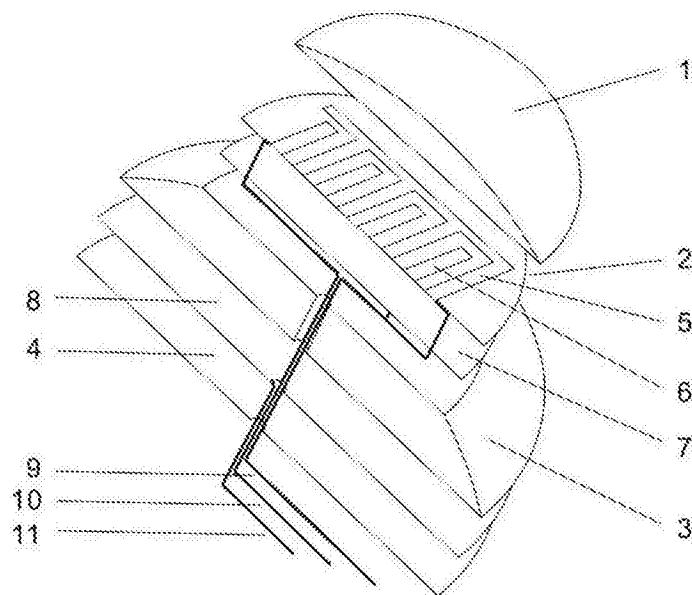


图 3

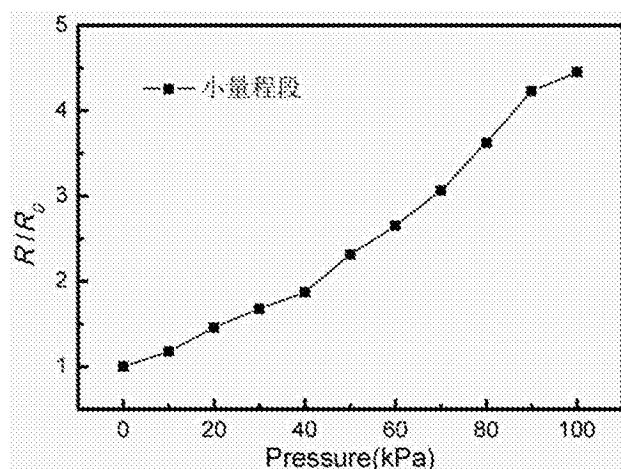


图 4

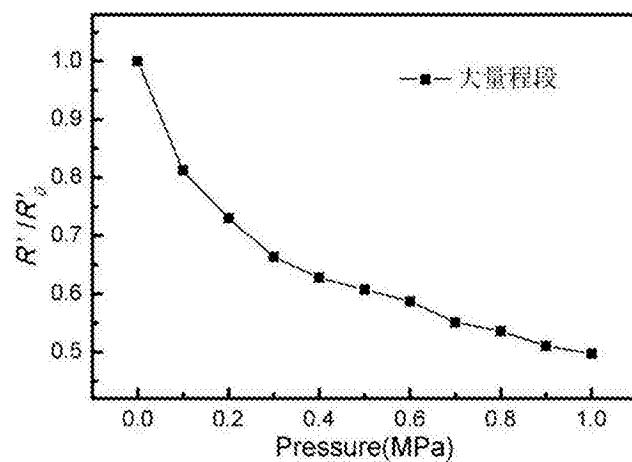


图 5

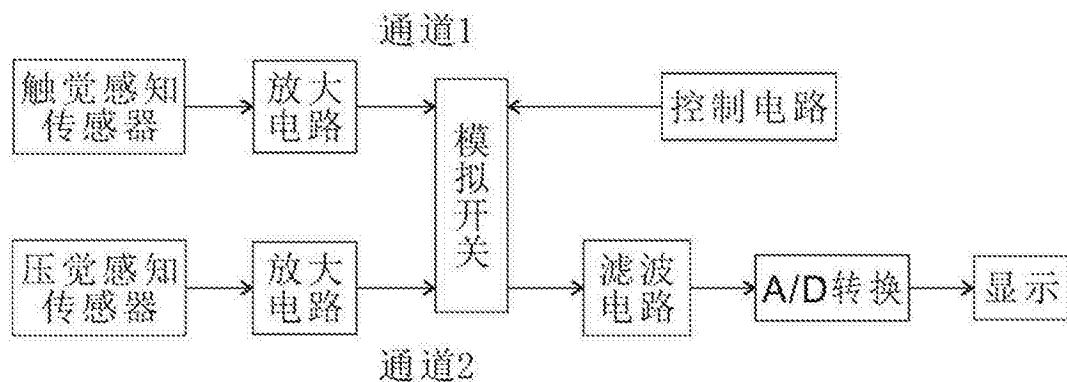


图 6