

# 高灵敏度柔性多层等强度梁式力/位移 传感器设计及传感理论研究\*

倪娜, 叶智鹏, 李东波, 赵冬

(西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

(我刊编委刘少宝推荐)

**摘要:** 针对目前柔性传感器大多数结构为薄膜形式, 不利于法向集中力与位移同时测量的问题, 设计并制备了一种基于多层离子皮肤(柔性电容传感片)的等强度梁式传感器。该触觉传感器由多层离子皮肤和等强度梁构成。当梁的自由端接触被测物时, 传感器可以将力或位移转化为输出的电容信号来进行法向接触力或位移的测量。建立了传感器电容变化量与梁自由端力/位移关系的传感理论模型, 并通过力/位移加载试验对传感理论模型进行验证。试验结果表明, 传感器的传感理论模型与试验结果吻合较好, 当传感器具有四层结构时, 对力/位移测量的灵敏度分别为 1.855 mN/pF 和 0.694 mm/pF。所能测得最小力为 0.02 mN, 最小位移为 0.01 mm, 同时该传感器表现出良好线性度 ( $R^2 = 0.994$ )。该传感理论模型可为此类传感器的设计提供理论依据, 在柔性机器和医疗健康检测等领域具有良好的应用前景。

**关键词:** 柔性传感器; 等强度悬臂梁; 位移; 力

**中图分类号:** TP212; O34 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.450063

## Design and Sensing Theory for Flexible Multi-Layer Equal Strength Beam Force/Displacement Sensors With High Sensitivity

NI Na, YE Zhipeng, LI Dongbo, ZHAO Dong

(School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology,  
Xi'an 710055, P.R.China)

(Recommended by LIU Shaobao, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** An equal-strength cantilever beam sensor based on the multi-layer ionic skin (flexible capacitance sensor chips) was designed and prepared, to solve the problem that most existing thin-film-structure flexible sensors cannot simultaneously measure concentrated normal forces and displacements. The proposed sensor is comprised of the multi-layer ionic skin and the equal-strength cantilever beam. The normal contact forces or displacements can be acquired through measurement of the capacitance change of the sensor, with the free end of the beam contacting the measured object. A theoretical sensing model of the relationship between capaci-

\* 收稿日期: 2024-03-11; 修订日期: 2024-05-08

**基金项目:** 陕西省自然科学基金基础研究计划(面上项目)(2023-JC-YB-059; 2023-JC-YB-060)

**作者简介:** 倪娜(1987—), 女, 副教授, 博士, 硕士生导师(E-mail: nina@xauat.edu.cn);

李东波(1982—), 男, 教授, 博士, 博士生导师(通讯作者, E-mail: ldb@xauat.edu.cn).

**引用格式:** 倪娜, 叶智鹏, 李东波, 赵冬. 高灵敏度柔性多层等强度梁式力/位移传感器设计及传感理论研究[J]. 应用数学和力学, 2024, 45(6): 775-786.

tance change and force/displacement was established and then verified through displacement/force loading tests. The test results show that, the sensing model is in good agreement with the test data. For the measurement of force and displacement, the sensitivity of the sensor with a 4-layer structure is 1.855 mN/pF and 0.694 mm/pF, respectively. The minimum measurable force is 0.02 mN and the minimum measurable displacement is 0.01 mm. At the same time, the sensor shows good linearity ( $R^2 = 0.994$ ). This sensing model provides a theoretical basis for the design of such sensors with good application prospects in the fields of flexible machines and medical health detection.

**Key words:** flexible sensor; equal strength cantilever beam; displacement; force

## 0 引 言

目前柔性触觉传感器被广泛应用于人机交互、医疗保健、柔性机器等领域<sup>[1]</sup>.传统刚性传感器受自身材料力学性能的限制,刚度高,变形能力差,无法满足柔性体力/位移监测的需求,因此柔性传感器在可穿戴设备、医疗器械等领域具有广泛的应用前景<sup>[2-3]</sup>.

在已知的研究中,柔性传感器按照传感方式主要可分为压电式、压阻式、光学式和电容式<sup>[4-6]</sup>.柔性电容式传感器相对于其他类型的传感方式在分辨率、灵敏度和准静态测量特性等方面更具优势<sup>[7-9]</sup>.柔性电容式传感器从信号传输原理上分为电子式和离子式.由柔性介电弹性体与离子凝胶导体构成的离子式电容传感器,又称离子皮肤<sup>[10]</sup>.离子皮肤的电极一般为离子凝胶.离子凝胶电极具有高拉伸率,甚至可拉伸至原长的10倍以上<sup>[11]</sup>.因此,相较于电子式柔性电容传感器,离子皮肤具有更好的延展性和韧性,且具有较高的灵敏度,能够灵敏地感知外部机械荷载的变化.Xu等<sup>[12]</sup>利用离子皮肤传感器设计了一种能够监测喉部震动时微小位移的语音识别系统.Zhou等<sup>[13]</sup>研制了一种具有交联螺旋结构的离子皮肤传感器,该传感器具有较高的灵敏度( $0.33 \text{ kPa}^{-1}$ ),能够检测0~200 Pa的压力.

柔性电容式传感器的传感性能不仅取决于材料属性<sup>[14]</sup>,还取决于传感器的结构形式,如将介电层增设空气层或添加微结构<sup>[15-16]</sup>可以提高传感器的灵敏度.Wang等<sup>[17]</sup>开发了具有空气夹层结构的柔性电容式传感器,该传感器主体采用树脂材料,兼备刚度低、透光率高、导电性强等优点,能分辨的最小力为0.04 N.Zhang等<sup>[18]</sup>设计了一种能够在低压下进行高精度测量的电容式压力传感器,该传感器采用多孔弹性海绵作为电介质,极大地提高了传感器的力学性能,能够检测0.018 N的力.Bai等<sup>[19]</sup>通过在介电弹性体上引入凹槽及颗粒状微结构增加了传感器的压强范围(0.08 Pa~360 kPa),在整个压力范围内该传感器具有18 Pa的压强分辨率.上述传感器的结构均属薄膜形式,对于压力的测量具有较好的灵敏度,但不利于对柔性体进行法向集中力与位移的测量.

基于悬臂梁结构的传感器较好地解决了同时进行法向力与位移测量的问题.彭星玲团队<sup>[20]</sup>设计了一种可同时测量力与位移的悬臂式光纤传感器,可测得最小力为1.1 mN,最小位移为0.005 mm.Sun等<sup>[21]</sup>将硅基应变传感器集成于柔性悬臂装置上,用于实时测量心肌细胞的收缩力,最小可测得0.02 mN的力与直径为1.61  $\mu\text{m}$ 细胞的微小搏动,悬臂梁结构使得该传感器灵敏度比传统金属应变传感器的灵敏度提高了17倍.然而,多数悬臂式结构的传感器采用刚性材料,传感器制作成本较高,设备体积较大,不利于在可穿戴设备及医疗领域的应用.

本团队前续研究了柔性等强度悬臂梁式的力和位移传感器<sup>[22]</sup>,该传感器由离子皮肤(由两个离子凝胶电极夹着介电弹性体构成的电容式应变传感片)和等强度基梁构成,具有较好的线性度,但对于微力与微位移测量的灵敏度还有待进一步提高.

基于前续工作,为提高传感器的灵敏度,本文利用多层离子皮肤的并联形式和等强度基梁,设计了一种高灵敏度多层等强度梁电容式力/位移传感器.该传感器通过将离子皮肤堆叠并联,提高了初始电容值,进而实现了传感器灵敏度的提升.同时,本文推导了传感器电容变化量与力/位移的传感理论模型,通过试验研究了该传感器电容变化量与力/位移的关系.本文设计的传感器所能测得的最小力为0.02 mN,最小位移为0.01 mm.

# 1 传感器设计及工作原理

## 1.1 传感器设计

传感器由两部分组成,一部分为变截面悬臂梁(等强度悬臂梁),另一部分为多层( $U$ 层)电容传感片(离子皮肤)。 $U(1,2,3,4,\dots)$ 层电容传感片的结构为  $U+1$  层离子凝胶电极夹着  $U$  层介电弹性体构成,层与层之间利用离子凝胶电极自身黏性相互黏接。例如,单层电容传感片由 2 层离子凝胶电极夹着介电弹性体构成,双层电容传感片由 3 层离子凝胶电极夹着 2 层介电弹性体构成,如图 1 所示。

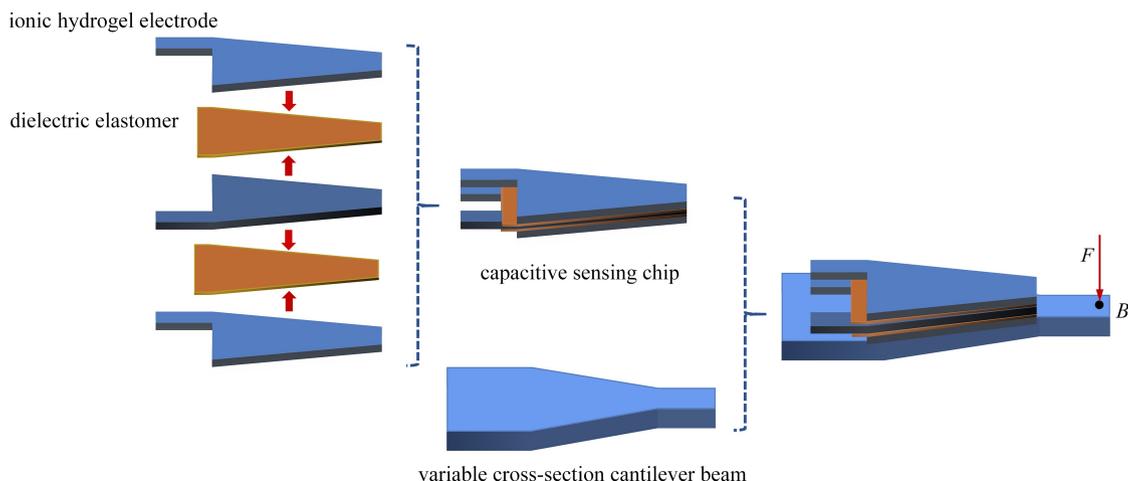


图 1 基于双层电容传感片的等强度梁式力/位移传感器结构示意图

Fig. 1 A force/displacement sensor based on a variable cross-section cantilever beam with the double-layer capacitive sensing chip

## 1.2 传感器工作原理

单层电容传感片相当于一个平行板电容器,被单轴拉伸时(图 2),电容变化量与应变关系为<sup>[10]</sup>

$$\Delta C = C \varepsilon_d, \tag{1}$$

其中, $C$ 为单层电容传感片的初始电容值。令  $C_0$  表示多层( $U$ 层)电容传感片的初始电容,多层电容传感片相当于  $U$  个平行板电容传感器并联,总的电容变化量与每个(第  $k$  个)平行板电容器的应变关系为

$$\Delta C = \left( C_0 \sum_{k=1}^U \varepsilon_{d_k} \right) / U. \tag{2}$$

由此可知,当集中力或者位移垂直作用在传感器悬臂梁自由端  $B$  点时(图 1),悬臂梁和其上的多层电容传感片产生形变。根据上述公式,电容传感片的变形导致电容改变。因此,该传感器可以将力或位移转化为输出的电容信号来进行力或位移的测量。

多层结构使得传感器电容变化量增大从而灵敏度变高,采用变截面悬臂梁(等强度悬臂梁)的构型能保证在梁自由端受到力/位移时梁表面各位置的应变相同,进而使得附着在梁上的多层电容式传感片的应变均匀变化,以此提升传感器的线性度<sup>[23]</sup>。

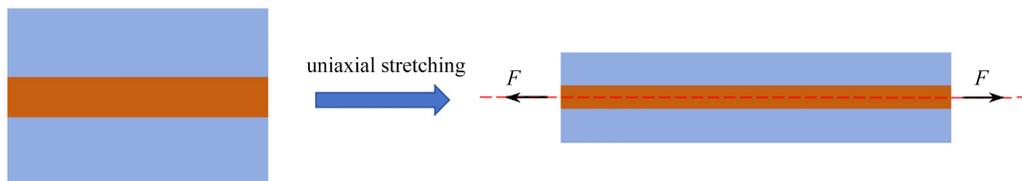


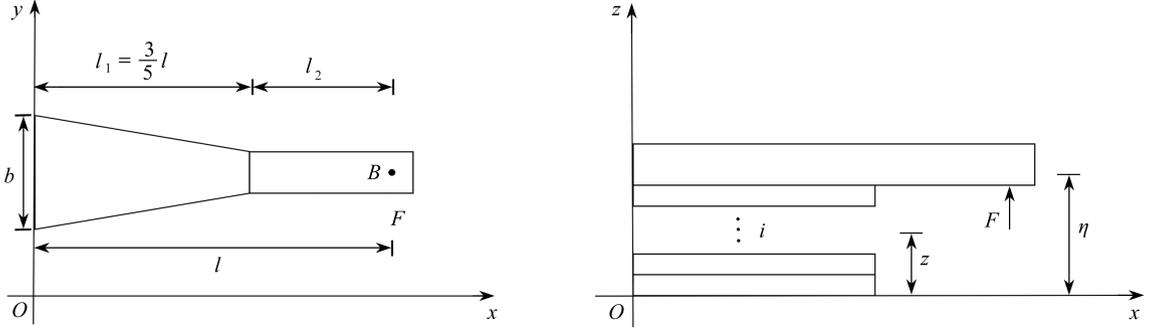
图 2 单轴拉伸时单层电容传感片的变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the deformation of a single-layer capacitive sensing chip under uniaxial stretching

## 2 传感理论模型

进一步探究该传感器的传感原理,为该类型的传感器制备及应用提供理论基础.传感器的电容变化量和梁自由端的集中力/挠度的理论关系推导如下.

针对传感理论模型的推导,我们做出以下假设:① 结构处于小变形且静力平衡状态;② 梁长度相对宽度和厚度足够长(梁长度值大于厚度值的5倍及以上),忽略剪切效应的影响;③ 每一段相邻层的界面是连续的,相邻段的交界面挠度与转角相同.设传感器有  $n$  层 2 段.图 3(a) 和 3(b) 为传感器的俯视图和侧视图.



(a) 传感器俯视图  
(a) The top view of the sensor

(b) 传感器侧视图  
(b) The side view of the sensor

图3 传感器的几何示意图

Fig. 3 Geometry of the sensor

### 2.1 梁自由端的力与电容变化量的关系

当多层电容式传感片粘贴在等强度悬臂梁时,传感器相当于多层复合梁,多层复合梁由于其处于平衡状态,所以其任意横截面沿  $x$  轴方向的力可以表示为

$$\sum_{i=1}^n P_i = 0, \quad (3)$$

其中,  $P_i$  为任意段第  $i$  层任意横截面上的轴向力.总轴力公式可以写为

$$\sum_{i=1}^n P_i = b(x) \sum_{i=1}^n \int_{z_i}^{z_{i+1}} E_i \cdot \varepsilon_i dz = 0, \quad (4)$$

式中,  $b(x)$  表示悬臂梁宽度,  $E_i$  表示第  $i$  层的弹性模量,  $\varepsilon_i$  为第  $i$  层的应变.根据几何关系有如下表达:

$$\varepsilon_i = (z_N - z) \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2}, \quad (5)$$

式中,  $z_N$  是多层梁第 1 段或者第 2 段中性层的位置.根据传感器构型,悬臂梁宽度表达式为

$$b(x) = \begin{cases} \frac{b(l-x)}{l}, & 0 \leq x < l_1, \\ \frac{2}{5}b, & l_1 \leq x \leq l_2. \end{cases} \quad (6)$$

将式(5)代入式(4)中,可得中性层的位置为

$$Z_N = \frac{\sum_{i=1}^n E_i H_i^2}{\sum_{i=1}^n E_i H_i}, \quad (7)$$

式中,  $H_i = z_{i+1} - z_i$ ,  $H_i^2 = (z_{i+1}^2 - z_i^2)/2$ .由平衡条件得

$$F(l-x) + b(x) \sum_{i=1}^n \int_{z_i}^{z_{i+1}} T_i z dz = 0, \quad (8)$$

式中,  $F$  表示垂直作用在梁自由端的力,  $T_i$  表示第  $i$  层上任意横截面沿  $x$  轴方向的应力,即

$$T_i = E_i \varepsilon_i. \quad (9)$$

将式(5)、(6)代入式(7),可得

$$F(l-x) + b(x) \left( z_N \frac{\partial^2 \omega_j}{\partial x^2} \sum_{i=1}^n E_i H_i^2 - \frac{\partial^2 \omega_j}{\partial x^2} \sum_{i=1}^n E_i H_i^3 \right) = 0, \quad (10)$$

式中,  $H_i^3 = (z_{i+1}^3 - z_i^3)/3$ .将式(7)代入式(10),得到的表达式代入式(5),整理得到第1段第*i*层任一点沿*x*轴的应变为

$$\varepsilon_i = (z_N - z) \frac{Fl}{Qb}, \quad (11)$$

$$\text{定义 } Q = \sum_{i=1}^n E_i H_i^3 - \left( \sum_{i=1}^n E_i H_i^2 \right)^2 / \sum_{i=1}^n E_i H_i.$$

多层(*U*层)电容传感片由*U*个平行板电容传感器并联而成,每个平行板电容器由两层离子凝胶夹着介电弹性体构成.由于介电弹性体层很薄,近似认为每个平行板电容器应变  $\varepsilon_{dk}$  等于介电弹性体上表面应变  $\varepsilon_{2i+1}$ ,即  $\varepsilon_{dk} = \varepsilon_{2i+1}$ .将式(11)代入式(2),可得基于*U*层电容传感片的等强度梁式传感器的电容变化量与力的关系为

$$\Delta C = \left( \left( \sum_{i=1}^U (z_{N1} - z_{2i+1}) \right) \frac{Fl}{Q_1 b} \right) C_0 / U. \quad (12)$$

## 2.2 梁自由端的挠度与电容变化量的关系

传感器电容变化量与挠度的关系推导如下.将式(11)代入式(5),可得到多层悬臂梁挠度微分方程为

$$\frac{\partial^2 \omega_j}{\partial x^2} = \frac{F(l-x)}{Qb(x)}, \quad (13)$$

$$\text{定义 } Q = \sum_{i=1}^u E_i H_i^3 - \left( \sum_{i=1}^u E_i H_i^2 \right)^2 / \sum_{i=1}^u E_i H_i.$$

当  $0 \leq x \leq l_1$  时,将式(6)代入式(13),可得

$$\frac{\partial^2 \omega_1}{\partial x^2} = \frac{Fl}{Q_1 b}. \quad (14)$$

对式(14)分别进行两次积分,可得多层梁第一段 ( $0 \leq x \leq l_1$ ) 任意截面传感器挠度  $\omega_1$  为

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial x} = \frac{Fl}{Q_1 b} x + S_1, \quad (15)$$

$$\omega_1 = \frac{Fl}{2Q_1 b} x^2 + S_1 x + S_2. \quad (16)$$

当  $x = 0$  时,梁固定端处挠度及转角均为0,因此由式(15)、(16)可得

$$\omega_1 = \frac{Fl}{2Q_2 b} x^2. \quad (17)$$

当  $l_1 \leq x \leq l_2$  时,将式(6)代入式(13),可得多层梁第二段挠度公式为

$$\frac{\partial^2 \omega_2}{\partial x^2} = \frac{5Fl(l-x)}{2Q_2 b}. \quad (18)$$

上式积分后得到多层梁第二段 ( $l_1 \leq x \leq l_2$ ) 挠度公式为

$$\omega_2 = \frac{5Flx^2}{4Q_2 b} - \frac{5Fx^3}{12Q_2 b} + B_1 x + B_2. \quad (19)$$

当  $x = 3l/5$  时,存在

$$\omega_1 \Big|_{x=3l/5} = \omega_2 \Big|_{x=3l/5}, \quad (20)$$

$$\frac{\partial \omega_1}{\partial x} \Big|_{x=3l/5} = \frac{\partial \omega_2}{\partial x} \Big|_{x=3l/5}. \quad (21)$$

将式(17)和式(19)代入式(20)和式(21),得到传感器力与挠度关系的公式为

$$\omega_2 = F \left( \frac{5lx^2}{4Q_2b} - \frac{5x^3}{12Q_2b} + \left( \frac{3l^2}{5Q_1b} - \frac{21l^2}{20Q_2b} \right) x + \frac{27l^3}{100Q_2b} - \frac{9l^3}{50Q_1b} \right). \quad (22)$$

所以在  $x = l$  处, 多层等强度悬臂梁挠度为

$$\omega_2(l) = \frac{4Fl^3}{75Q_2b} + \frac{21Fl^3}{50Q_1b}. \quad (23)$$

将式(23)代入式(13), 可得电容变化量  $\Delta C$  与多层等强度悬臂梁挠度之间的关系如下:

$$\Delta C = \frac{\left( \sum_{i=1}^U (z_{N1} - z_{2i+1}) \right) \omega_2(l) C_0}{\left( \frac{4l^2}{75Q_2} + \frac{21l^2}{50Q_1} \right) Q_1 U}. \quad (24)$$

由式(23)、式(12)和式(24)可知, 在一定力的范围内(小变形), 多层等强度悬臂梁自由端的力与挠度呈线性关系, 力和挠度均与电容变化量呈线性关系. 从理论上可以看出, 本柔性多层等强度梁式传感器既可测量力又可测量位移.

### 3 传感器的标定

在准静态下, 试验研究所设计的传感器当其悬臂梁自由端受到垂直于梁表面的集中力/位移时传感器的电容变化, 并与理论公式(12)进行对比分析.

#### 3.1 传感器的制备

传感器是由多层( $U$ 层)电容式传感片粘贴于等强度硅橡胶悬臂梁而构成. 其中, 多层电容式传感片是由离子凝胶电极夹着介电弹性体(硅橡胶)构成的多层结构. 为了探究多层( $U$ 层)电容式传感片对于传感器灵敏度和线性度的影响, 制备了单层传感片、双层传感片、三层传感片和四层传感片. 将其分别粘贴于等强度硅橡胶悬臂梁表面形成4个力/位移传感器, 将4个传感器分别简称为单层传感器、双层传感器、三层传感器和四层传感器. 制备的4个传感器见图4.

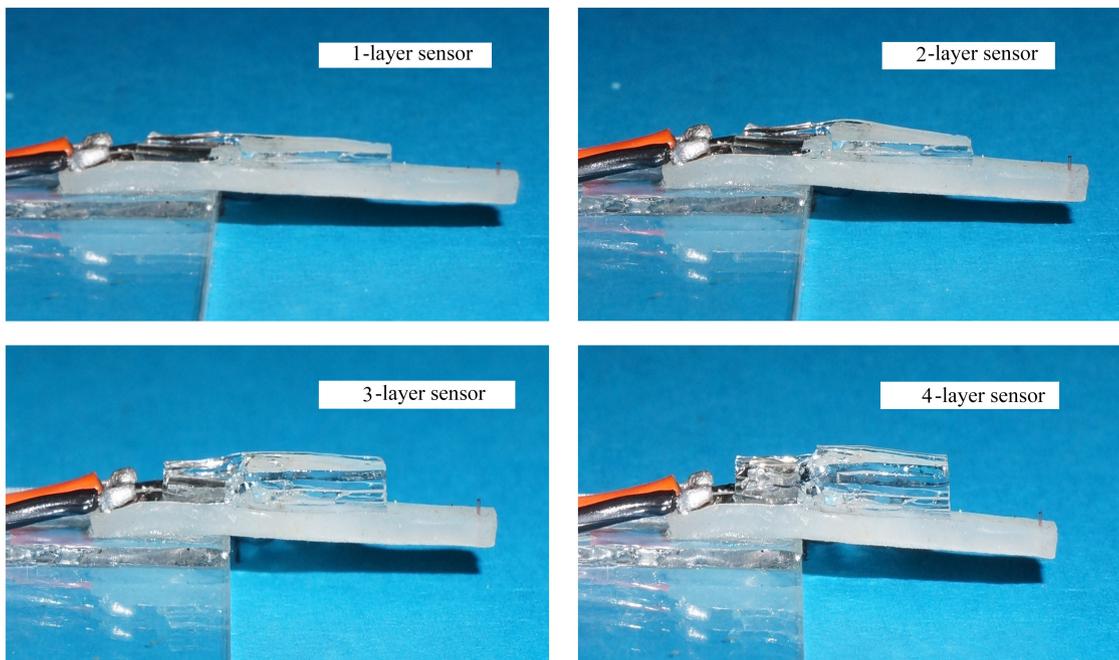


图4 具有不同层数传感片的传感器

Fig. 4 The sensors with different-layer sensing chips

离子水凝胶电极的制备方法如下: 将丙烯酰胺(AM)和氯化锂( $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ )溶解在去离子水中. 丙烯酰胺和氯化锂的浓度分别为  $2.2 \text{ mol/L}$  和  $8 \text{ mol/L}$ . 搅拌均匀并静置  $15 \text{ min}$ , 待溶液冷却后依次加入交联剂(N,

N'-亚甲基双丙酰胺, MBAA)、热引发剂(过硫酸铵, AP)和催化剂(N, N, N', N'-四甲基乙二胺, TEMED), 所用的 MBAA、AP、TEMED 含量分别为 AM 质量的 0.06%、0.17%、0.05%。将配制好的溶液注入玻璃模具中, 将盛有溶液的玻璃模具放入 50 °C 的干燥箱中 2 h 使之成胶。将制备好的离子凝胶电极在室温 (25 °C, 19%RH) 放置超过 48 h 令其失水达到稳定状态后, 采用激光切割机 (PL6080, Han's Laser Technology Industry Group Co., Ltd.) 对离子凝胶电极进行切割。离子水凝胶主体形状为等腰梯形, 上底边长为 5 mm, 下底边长为 2 mm, 厚度为 0.653 mm。

介电弹性体采用一种商业橡胶硅材料 (EcoFlex 0050, Smooth-On, USA)。首先 1:1 混合 EcoFlex 预聚物 A 和 B, 然后将混合物放入真空箱进行真空处理排出气泡, 随后使用流延机 (MSK-AFA-L800, Hefei Kejing Materials Technology Co., Ltd., China) 将混合物涂在聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 薄膜上, 令其在室温下固化 3 h。从 PET 上剥离的硅橡胶薄膜 (介电弹性体) 厚度为 0.032 mm。

等强度悬臂梁同样由橡胶硅 (EcoFlex 0050) 制成。将硅橡胶预聚物 A 和 B 混合并采用真空除去气泡处理后倒入自制的模具中, 静置 12 h 使其完全固化后取出。将制备的硅橡胶薄膜同样切割为上底边长为 5 mm, 下底边长为 2 mm 的等腰梯形。悬臂梁长度为 15 mm, 固定端宽为 5 mm, 自由端宽为 2 mm。

利用离子凝胶电极的黏性将装配好的多层电容式传感片粘贴于等强度梁表面。

### 3.2 试验装置

如图 5(a) 所示, 通过氰基丙烯酸酯黏合剂将传感器一端粘贴在有机玻璃板上, 有机玻璃板固定于铁架台, 形成梁的固定端。为了试验研究传感器电容变化量与力的关系, 通过自制的纸盒 (0.1 mg) 和砝码进行集中力的加载。传感器的离子凝胶电极与屏蔽线相连, 连接到电容测量系统, 以便进行电容数据的采集。

如图 5(b) 所示, 将该多层等强度梁传感器的固定端固定于铁架台上。为了试验研究传感器电容变化量与位移的关系, 将梁自由端 (B 点) 通过不可拉伸的尼龙细线与万能电子试验机 (WDW-100C, Shanghai Hualong Test Instrument Co., Ltd., China) 相连。以 6 mm/min 的速率向下竖直拉伸尼龙绳来实现位移载荷的施加。电容值通过电容测量系统进行测试采集。

电容测量系统 (PCap01 EVA-KIT) 是由主板、插入式模块、PICOPROG 编程器和基于评估软件的 WINDOWS 对话框组成。PICOPROG V2.0 编程器作为 PC 接口, 通过 USB 连接线与 PC 机相连。电容传感片通过屏蔽线与主板相连, 屏蔽线用于减少寄生电容的影响。电容测量系统可测得的电容范围为 0 fF ~ 100 nF。

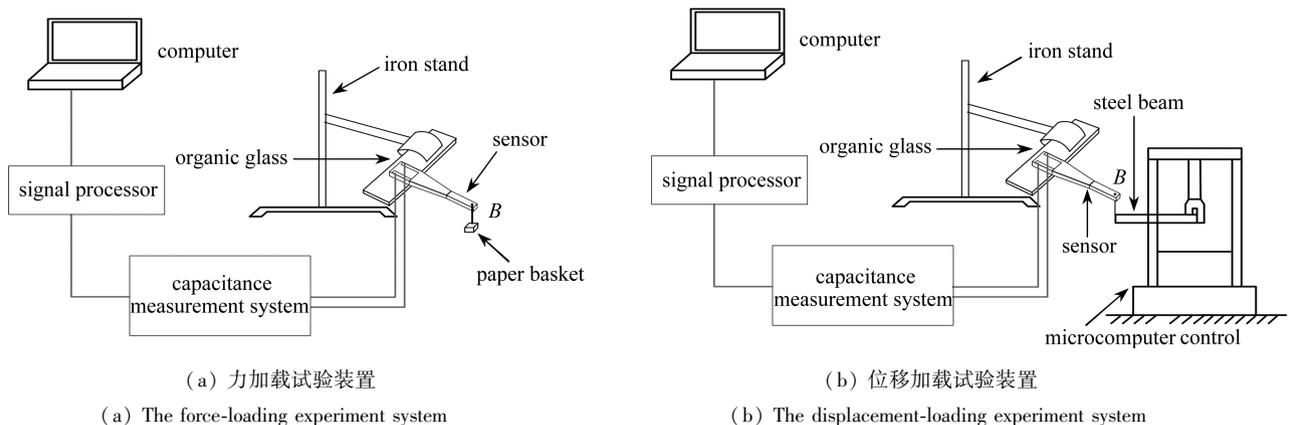


图 5 试验装置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the test instrument

### 3.3 试验结论

为研究传感器的力传感性能, 分别对 4 个传感器逐步施加 1 mN 的力。如图 6 为不同层数传感器电容变化量与力的关系。在 0~1 mN 的范围内, 电容变化量随着力的增加而增加, 力与电容变化量具有很好的线性关系。实验数据与理论公式 (12) 曲线吻合很好。对试验数据进行拟合, 获得的拟合曲线斜率为传感器对力测量的灵敏度。不同层数传感器的灵敏度分别为 0.460 mN/pF, 0.951 mN/pF, 1.413 mN/pF 和 1.855 mN/pF, 相关系数分别为 0.999, 0.995, 0.994 和 0.996, 相较于文献 [24-26] 中传感器的拟合相关系数 0.978, 0.988, 0.983, 本

文中的传感器具有较好的线性度.该传感器随着层数的增加灵敏度不断增高,然而受制于材料自身黏性的限制,当传感器层数大于5层时,层与层之间产生严重滑移,没有测得试验数据.

为研究该传感器的位移传感性能,分别对每个传感器自由端( $B$ 点)施加 $0\sim 3$  mm的位移,得到如图7所示4个传感器的电容变化量与位移关系.在 $0\sim 3$  mm 竖直向下的位移时,电容变化量随着位移的增加而增加,位移与电容变化量具有很好的线性关系.试验数据与理论公式(24)曲线吻合很好.对试验数据进行拟合,获得的拟合曲线斜率是每个传感器对位移测量的灵敏度,灵敏度分别为 $0.169$  mm/pF, $0.322$  mm/pF, $0.513$  mm/pF 和 $0.694$  mm/pF.

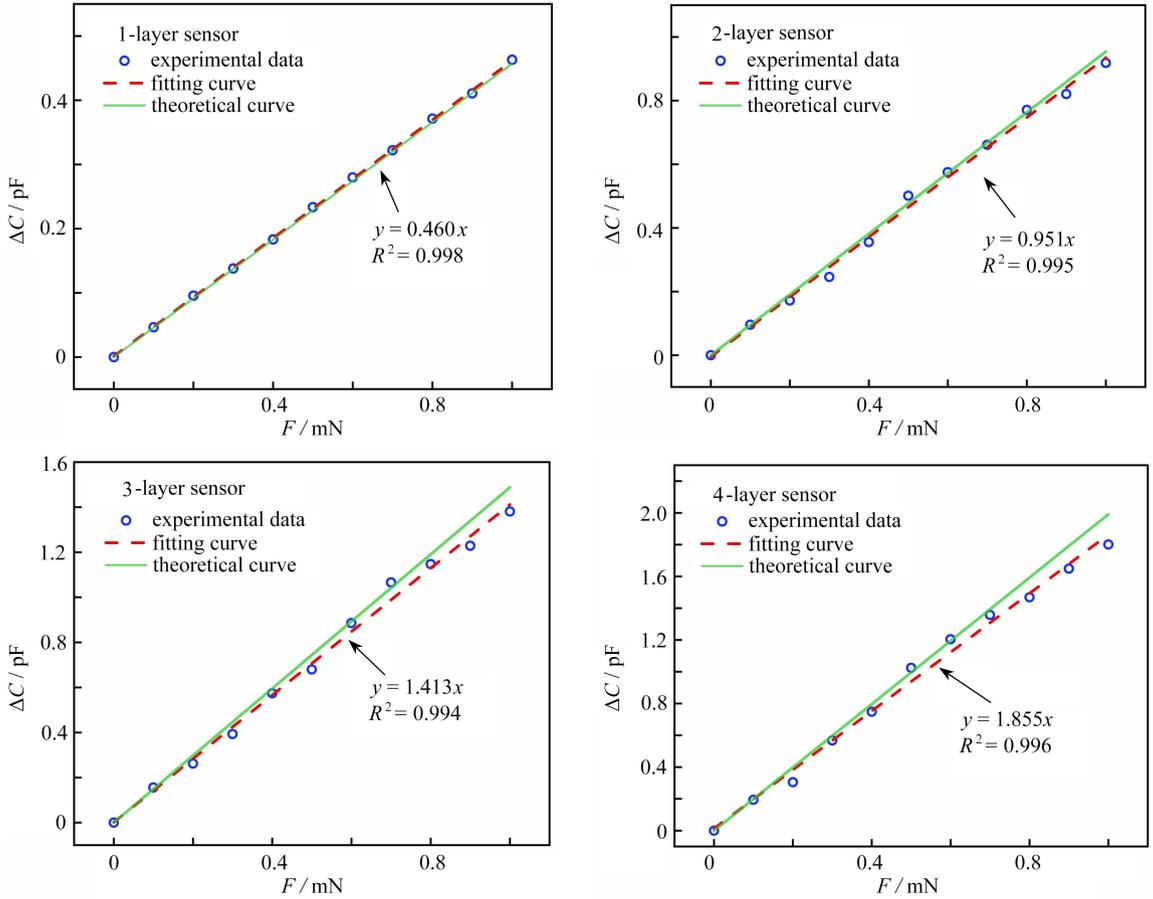
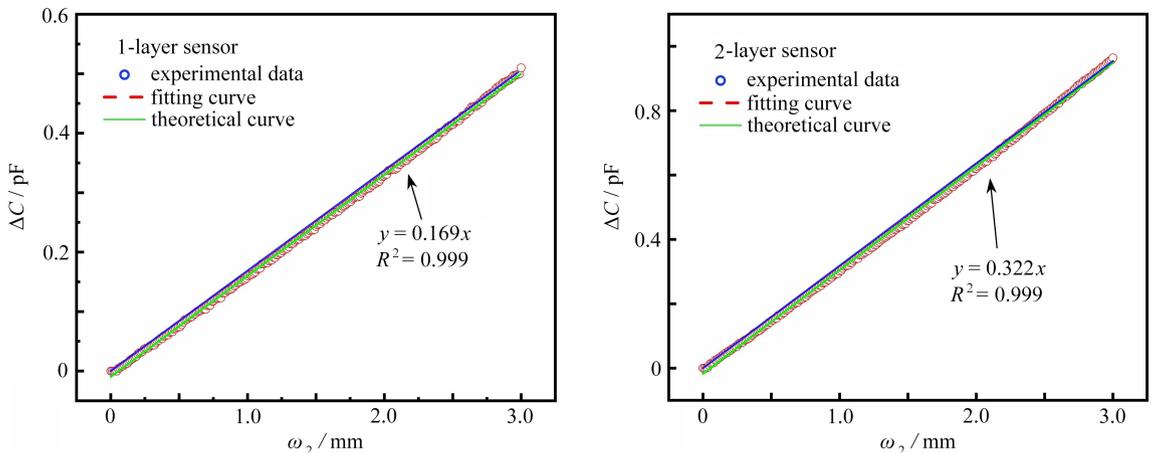


图6 不同层数传感器电容变化量与力的关系

Fig. 6 The relationships between capacitance changes and forces with different-layer capacitive sensing chips



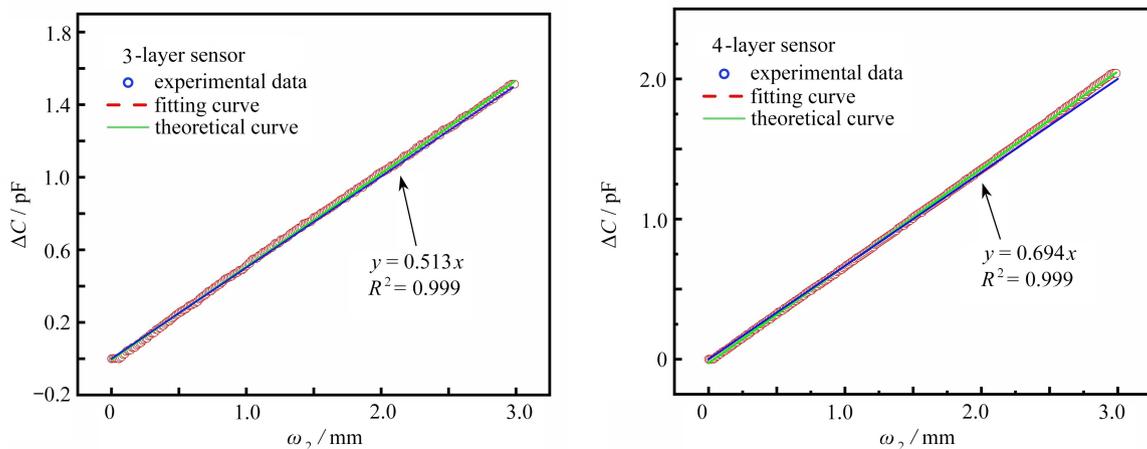


图 7 不同层数传感器电容变化量与位移关系

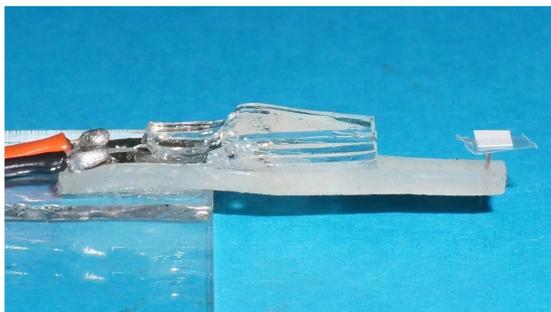
Fig. 7 The relationships between capacitance changes and displacements with different-layer capacitance sensing chips

### 4 阈值测试

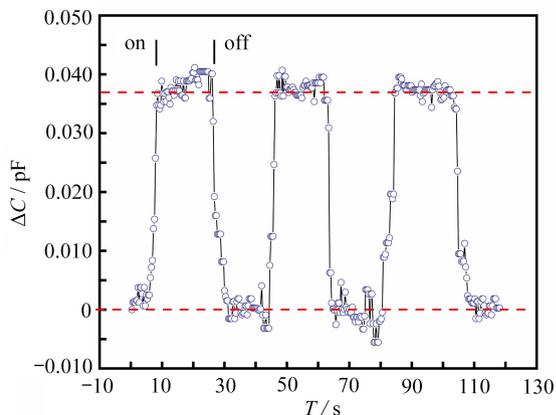
为了证明四层传感器的灵敏度优越特性,对传感器的阈值(能测量的最小力与最小位移)进行试验,并将其与其他传感器<sup>[27-33]</sup>进行对比。

为了得到传感器所能测量的最小力,如图 8(a)所示,将质量为 2 mg(0.02 mN)的长方形纸片放置于传感器自由端的自制置物台上.如图 8(b)所示,当传感器上放置 2 mg 的纸片时,可测得明显且稳定的电容变化,电容变化量约为 0.037 pF.因此该传感器可测得的力为 0.02 mN 及以上.如表 1 所示,相较于文献中的柔性力传感器,本传感器更灵敏,可测量的最小力更小。

为了得到传感器所能测量的最小位移值,如图 9(a),将传感器自由端通过不可拉伸的尼龙绳与万能试验机(HJ-500 kg, Domngguan Hongjin, China)相连接,控制试验机,对传感器自由端施加竖直方向为 0.01 mm 的往复位移.如图 9(b)所示,当位移为 0.01 mm 时,传感器产生明显的电容变化量,电容变化量约为 0.007 pF.因此该传感器可以测量 0.01 mm 及以上的位移.如表 2 所示,相较于其他文献的位移传感器,该传感器对位移的最小分辨率相对较高.文献[16,34]中的阈值虽然更低,但其为硬质传感器,而本文传感器较柔软、刚度小,适用于柔软物质的测量。



(a) 纸片(0.02 mN)放置于传感器自由端  
(a) The paper sheet (0.02 mN) placed at the free end of the sensor



(b) 0.02 mN 力作用时传感器的电容变化量  
(b) The capacitance changes under the load in on-off states

图 8 最小力测试

Fig. 8 The test of the minimum force

表1 不同传感器可测量的最小力对比

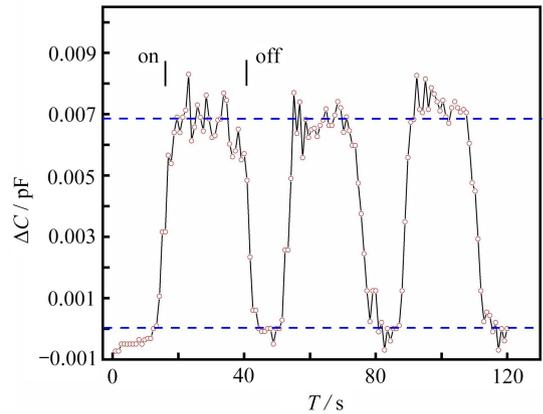
Table 1 Minimum detectable forces with different sensor types

source	type	minimum detectable force
ref. [27]	capacitance sensor	0.07 N
ref. [28]	capacitance sensor	0.01 N
ref. [29]	capacitance sensor	0.009 N
ref. [30]	capacitance sensor	0.05 mN
ref. [20]	fiber Bragg grating sensor	0.011 N
ref. [31]	piezoresistive sensor	0.08 N
ref. [32]	piezoelectric sensor	0.05 N
ref. [33]	optical sensor	0.52 mN
this work	capacitance sensor	0.02 mN



(a) 0.01 mm 位移施加在传感器自由端

(a) The displacement of 0.01 mm applied at the free end of the sensor



(b) 0.01 mm 位移施加时传感器的电容变化量

(b) The capacitance changes under the load in on-off states

图9 最小位移测试

Fig. 9 Test of minimum displacement

表2 不同传感器所探测到的最小位移对比

Table 2 Minimum detectable displacements with different sensor types

source	types	minimum limit of force detection
ref. [20]	fiber Bragg grating sensor	0.005 mm
ref. [34]	fiber Bragg grating sensor	0.01 mm
ref. [35]	flexible ultrasonic sensor	0.01 mm
this work	flexible capacitance sensor	0.01 mm

## 5 结 论

本文设计了一种基于离子皮肤的多层等强度悬臂梁力/位移传感器,推导了该种多层复合梁传感器电容变化量与力/位移之间的理论模型,并通过试验验证了理论模型的正确性,测试了传感器的传感性能,主要结论如下:

1) 本文基于多层柔性电容传感片(多层离子皮肤),设计了一种多层等强度悬臂梁式力/位移传感器.通过将离子皮肤堆叠形成多层并联的电容传感片,提高初始电容值,进而提升了该类传感器的灵敏度.

2) 针对所设计的传感器,建立了传感理论模型,并通过实验测试了传感器电容变化量与力/位移的关系,验证了理论模型的正确性,为该类传感器的设计提供了理论依据.

3) 试验证实,随着电容传感片层数的增加,传感器的灵敏度增加,4层电容传感片构成的传感器达到最佳性能状态,此时对力与位移测量的阈值分别为0.02 mN与0.01 mm.

4) 本文所提出的多层柔性等强度悬臂梁式电容传感器具有灵敏度高、线性度优良、分辨率高、刚度低等特点,在软机器人和医疗健康领域具有较好的应用前景。

#### 参考文献(References):

- [1] 苏炳添,李健良,徐慧华,等.科学训练辅助:柔性可穿戴传感器运动监测应用[J].中国科学:信息科学,2022,52(1):54-74. (SU Bingtian, LI Jianliang, XU Huihua, et al. Scientific athletics training: flexible sensors and wearable devices for kineses monitoring applications[J]. *Scientia Sinica: Informationis*, 2022, 52(1): 54-74. (in Chinese))
- [2] 王海涛,彭熙凤,林本末.软体机器人研究进展[J].华南理工大学学报(自然科学版),2020,48(2):94-106. (WANG Haitao, PENG Xifeng, LIN Benmo. Research development of soft robots[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(2): 94-106. (in Chinese))
- [3] 许会超,苗新刚,汪苏.基于FBG的机器人柔性触觉传感器[J].机器人,2018,40(5):634-639. (XU Huichao, MIAO Xingang, WANG Su. A flexible tactile sensor for robot based on FBG[J]. *Robot*, 2018, 40(5): 634-639. (in Chinese))
- [4] KUANG L, LOU Y, SONG S. Design and fabrication of a novel force sensor for robot grippers[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(4): 1410-1418.
- [5] 林鹏,王长利,李迅,等.压杆式压电应力传感器在爆炸冲量测试中的应用[J].应用数学和力学,2015,36(S1):29-35. (LIN Peng, WANG Changli, LI Xun, et al. Application of the piezoelectric pressure bar gauge to blast impulse measurement[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2015, 36(S1): 29-35. (in Chinese))
- [6] 赵智忠,王春雷,王博文.适用于智能机械手的Galfenol悬臂梁式力传感器设计[J].仪表技术与传感器,2020(9):1-5. (ZHAO Zhizhong, WANG Chunlei, WANG Bowen. Galfenol cantilever beam force sensor design suitable for intelligent manipulator[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2020(9): 1-5. (in Chinese))
- [7] YANG W D, DING W X, LIU M L, et al. A theoretical model of a flexible capacitive pressure sensor with microstructured electrodes for highly sensitive electronic skin[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2022, 55(9): 094001.
- [8] DONG T Y, GU Y, LIU T, et al. Resistive and capacitive strain sensors based on customized compliant electrode: comparison and their wearable applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2021, 326: 112720.
- [9] BASARIR F, MADANI Z, VAPAAVUORI J. Recent advances in silver nanowire based flexible capacitive pressure sensors: from structure, fabrication to emerging applications[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, 9(31): 2200866.
- [10] SUN J Y, KEPLINGER C, WHITESIDES G M, et al. Ionic skin[J]. *Advanced Materials*, 2014, 26(45): 7608-7614.
- [11] GOU X, YANG J, LI P, et al. Biomimetic nanofiber-iongel composites for flexible pressure sensors with broad range and ultra-high sensitivity[J]. *Nano Energy*, 2024, 120: 109140.
- [12] XU S J, YU J X, GUO H S, et al. Force-induced ion generation in zwitterionic hydrogels for a sensitive silent-speech sensor[J]. *Nature Communications*, 2023, 14(1): 219.
- [13] ZHOU L J, WANG Z W, WU C S, et al. Highly sensitive pressure and strain sensors based on stretchable and recoverable ion-conductive physically cross-linked double-network hydrogels[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, 12(46): 51969-51977.
- [14] STANO G, DI NISIO A, LANZOLLA A M, et al. Additive manufacturing for capacitive liquid level sensors[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 123(7/8): 2519-2529.
- [15] ARSHAD A, SALEEM M M, TIWANA M I, et al. A high sensitivity and multi-axis fringing electric field based capacitive tactile force sensor for robot assisted surgery[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 354: 114272.
- [16] 王瑞荣,侯鹏飞,刘继军,等.基于微结构PDMS介质层的电容式柔性阵列压力传感器[J].微纳电子技术,2019,56(5):389-393. (WANG Ruirong, HOU Pengfei, LIU Jijun, et al. Capacitive flexible array pressure sensor based on the microstructure PDMS dielectric layer[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2019, 56(5):

- 389-393. (in Chinese))
- [17] WANG Y C, CHEN T Y, CHEN R, et al. Mutual capacitive flexible tactile sensor for 3-D image control[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems; a Joint IEEE and ASME Publication on Microstructures, Microactuators, Microsensors, and Microsystems*, 2013, **22**(3): 804-814.
- [18] ZHANG Y Z, LIN Z K, HUANG X P, et al. Highly sensitive capacitive pressure sensor with elastic metallized sponge[J]. *Smart Materials and Structures*, 2019, **28**(10): 105023.
- [19] BAI N N, WANG L, WANG Q, et al. Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultra-broad-range high sensitivity[J]. *Nature Communications*, 2020, **11**(1): 209.
- [20] 彭星玲, 茶映鹏, 叶建雄, 等. 基于 FBG 的悬臂梁式微力与微位移传感单元[J]. 激光与红外, 2022, **52**(6): 870-874. (PENG Xingling, CHA Yingpeng, YE Jianxiong, et al. Cantilever beam type micro-force and micro-displacement sensing unit based on fiber bragg grating[J]. *Laser and Infrared*, 2022, **52**(6): 870-874. (in Chinese))
- [21] SUN H, KIM D S, SHANMUGASUNDARAM A, et al. Enhancing cardiomyocytes contraction force measuring in drug testing: integration of a highly sensitive single-crystal silicon strain sensor into SU-8 cantilevers[J]. *Biosens Bioelectron*, 2024, **243**: 115756.
- [22] NI N, XUE X M, LI D B. Extra-soft tactile sensor for sensitive force/displacement measurement with high linearity based on a uniform strength beam[J]. *Materials*, 2021, **14**(7): 1743.
- [23] 王单, 王健. 重力载荷作用下柔性梁的结构变形与承载力分析[J]. 应用数学和力学, 2021, **42**(6): 611-622. (WANG Dan, WANG Jian. Analysis of deformation and bearing capacity of flexible beams under gravitational loads[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(6): 611-622. (in Chinese))
- [24] QIU K Y, ZHAO Z C, HAGHIASHTIANI G, et al. 3D printed organ models with physical properties of tissue and integrated sensors[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2018, **3**(3): 1700235.
- [25] 谢思豪, 陶青, 陈思远. SMS 结构的光纤 F-P 腔压力传感器的实验研究[J]. 传感器与微系统, 2024, **43**(1): 56-58. (XIE Sihao, TAO Qing, CHEN Siyuan. Experimental research of optical fiber F-P cavity pressure sensor with SMS structure[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2024, **43**(1): 56-58. (in Chinese))
- [26] MORAIS E, PONTES M J, MARQUES C, et al. Liquid level sensor with two FBGs embedded in a PDMS diaphragm: analysis of the linearity and sensitivity[J]. *Sensors*, 2022, **22**(3): 1268.
- [27] DAI Y, CHEN J, TIAN W, et al. A PVDF/Au/PEN multifunctional flexible human-machine interface for multi-dimensional sensing and energy harvesting for the internet of things[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, **20**(14): 7556-7568.
- [28] LIU Y, WO H, HUANG S, et al. A flexible capacitive 3D tactile sensor with cross-shaped capacitor plate pair and composite structure dielectric[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, **21**(2): 1378-1385.
- [29] JINHUI Z, HAIMIN Y, JIAYING M, et al. Finger-inspired rigid-soft hybrid tactile sensor with superior sensitivity at high frequency[J]. *Nature Communications*, 2022, **13**(1): 5076.
- [30] LUO Z B, CHEN J, ZHU Z F, et al. High-resolution and high-sensitivity flexible capacitive pressure sensors enhanced by a transferable electrode array and a micropillar-PVDF film[J]. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2021, **13**(6): 7635-7649.
- [31] JUNG Y, LEE D G, PARK J, et al. Piezoresistive tactile sensor discriminating multidirectional forces[J]. *Sensors*, 2015, **15**(10): 25463.
- [32] 洪吉, 任宗金, 于时恩, 等. 压电传感器的毫牛级摩擦力测量[J]. 压电与声光, 2022, **44**(6): 885-889. (HONG Ji, REN Zongjin, YU Shinen, et al. Measurement of friction force at milli-Newton level with piezoelectric sensors[J]. *Piezoelectrics and Acousto-optics*, 2022, **44**(6): 885-889. (in Chinese))
- [33] LI T, PAN A, REN H. A high-resolution triaxial catheter tip force sensor with miniature flexure and suspended optical fibers[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, **67**(6): 5101-5111.
- [34] WU J H, XU Z L, ZHANG Y X, et al. High-resolution two-degree-of-freedom displacement measurement based on fiber Fabry-Perot interferometer and Pound-Drever-Hall technique[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, **23**(15): 16859-16865.
- [35] MORIMOTO T, AKAGI T, DOHTA S, et al. Development of flexible displacement sensor using ultrasonic sensor for flexible pneumatic robot arm[J]. *Procedia Computer Science*, 2015, **76**: 107-112.