

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.05.06

柔性压力传感器研制及其静/动态性能验证

杨水旺¹, 付政伟¹, 赵质良², 杜雨丰¹

(1. 北京振兴计量测试研究所, 北京 100074; 2. 中国人民解放军 92493 部队, 辽宁 葫芦岛 125000)

摘要: 为了解决飞行器高速飞行过程中精细化感知壁面静态压力分布与动态压力变化的复杂问题, 通过精细配比聚二甲基硅烷-碳纳米管(Polydimethylsilane-Carbon Nanotubes, PDMS-CNTs)的材料浓度, 并键合连接传感器的电极层和介电层, 研制了一款基于PDMS介电材料的电容式柔性压力传感器, 克服了传感器电极层和介电层界面摩擦、能量损失失配的难点。通过静/动态性能验证实验, 验证了传感器的静态压力分布以及动态压力变化。结果显示, 所研制的传感器在检测 0.1 ~ 104.9 kPa 静态压力的同时, 能够实现 10 ~ 2 000 Hz 振动频率条件下的动态压力检测, 具有良好的静/动态压力感知能力。可将此柔性压力传感器应用于飞行器复杂的曲面结构, 其在优化飞行器的气动外形方面具有良好的应用前景。

关键词: 飞行器参数测量; 静态压力测量; 动态压力测量; 电容式柔性传感器; PDMS 介电层

中图分类号: TB93; TQ340; TP212 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 05-0048-09

Development of a flexible pressure sensor and verification of its static/dynamic performance

YANG Shuiwang¹, FU Zhengwei¹, ZHAO Zhiliang², DU Yufeng¹

(1. Beijing Zhenxing Institute of Metrology and Measurement, Beijing 100074, China;

2. NO.92493 of PLA, Huludao 125000, China)

Abstract: In order to solve the complex problem of finely sensing the static pressure distribution and dynamic pressure changes on the wall during high-speed flight of aircraft, a capacitive flexible pressure sensor based on PDMS dielectric material was developed by finely matching the material concentration of PDMS-CNTs and bonding the electrode layer and dielectric layer of the sensor. The difficulty of interface friction and energy loss mismatch between electrode layer and dielectric layer was overcome. The static pressure distribution and dynamic pressure change of the sensor were verified by static/dynamic performance verification experiments. The results show that the developed sensor can detect the static pressure of 0.1 ~ 104.9 kPa, can realize the dynamic pressure detection under the vibration frequency of 10 ~ 2 000 Hz, and has good static/dynamic pressure sensing ability. The flexible pressure sensor can be applied to the complex curved structure of aircraft, and has a good application prospect in optimizing the aerodynamic shape of aircraft.

Key words: aircraft parameter measurement; static pressure measurement; dynamic pressure measurement; capacitive flexible sensor; PDMS dielectric layer

收稿日期: 2024-10-07; 修回日期: 2024-10-25

基金项目: 国家重点基础研究项目(2023-XXXX-JJ-0576); 北京振兴计量测试研究所创新项目(99300004636)

引用格式: 杨水旺, 付政伟, 赵质良, 等. 柔性压力传感器研制及其静/动态性能验证[J]. 计测技术, 2024, 44(5): 48-56.

Citation: YANG S W, FU Z W, ZHAO Z L, et al. Development of a flexible pressure sensor and verification of its static/dynamic performance[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(5): 48-56.



0 引言

精细化感知飞行器高速飞行过程中的壁面静态压力分布与动态压力变化,可以实时监测飞行器在高速飞行过程中的压力状态,有助于及时发现潜在的异常压力区域,从而降低飞行器在飞行过程中因压力异常导致的失控风险;有助于了解飞行器在高速飞行过程中的气动特性,通过准确的数据反馈优化飞行器的气动外形,增强飞行器的环境适应能力。然而,目前针对飞行器的静/动态压力测量,主流的测量方式仍然是在飞行器壁面打孔、螺纹安装刚性传感器,此种方式容易影响飞行器的整体结构和流场工况,一定程度上会破坏飞行器的气动外形。

柔性压力传感器作为压力传感器的一个重要分支,近年来因其具有优异的力学性能和良好的灵敏性,被广泛应用于医学诊断、电子皮肤、人工智能等重要领域^[1-4]。因其能够同时感知并响应外界的静态压力分布与动态压力变化,柔性压力传感器为航空航天领域的发动机设计性能优化、飞行器壁面来流影响、飞行器健康监测等诸多应用场景的静/动态压力的精准监测、动态分析提供了可能;此外,柔性压力传感器凭借其独特的柔韧性、高灵敏度以及能够贴合复杂曲面结构的特性,对飞行器的整体结构和流场工况的影响较小,在优化飞行器气动外形方面展现出良好的应用前景。然而,目前已公开的报道中,仅是介绍了柔性压力传感器的静态性能,而暂未有针对其动态性能分析的研究报道,导致其能够感知动态压力变化的性能难以体现。

依据信号转换机理,可将柔性压力传感器分为电阻式^[5-7]、压电式^[8-10]和电容式^[11-13]。其中,电容式压力传感器具有灵敏度高、响应时间短、检测范围广等优点,近年来被广泛应用于许多新兴的

柔性力学检测电子器件;然而,其响应松弛速度通常较慢(几十毫秒),导致无法检测到动态压力信号。

在传感器原理和制备流程无变革的基础上,针对上述问题,在工艺上通过精细配比PDMS-CNTs的材料浓度,并键合连接传感器的电极层和介电层,研制了一款基于PDMS介电材料的电容式柔性压力传感器,并对其开展了静态、动态性能验证。

1 检测原理

如图1所示,本文研制的电容式柔性压力传感器由许多微锥形电容器和一个并联的网状气隙电容器组成。基于成分-结构设计的协同效应,随着压力从0 kPa开始增加,介电常数也随之增加(电介质层被压缩,从而导致介电常数发生改变);同时,当对传感器施加压力时,砂纸倒模的电介质层上的微锥会被压缩,从而改变传感器的极板间距 d ,使其电容值升高,根据电容值的变化即可得出对应的压力大小。

电容式压力传感器由2个平行的电极与夹在电极中间的介电层形成的“三明治”结构构成。电容式柔性压力传感器的电容 C 由式(1)计算^[14]。

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d} \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数($8.82 \times 10^{-12} \text{ F/m}$), ϵ_r 为介电层材料的相对介电常数, A 和 d 分别为顶部电极和底部电极的有效正对面积和距离。电容式压力传感器处在外部应力作用时,会产生弹性形变,由此引起 A 、 d 变化,最终导致电容值发生变化。

传统的微结构压力传感器在电极和电介质之间存在间隙,而本文所研制的传感器由PDMS-CNTs材料系统制成,具有粘合电极-介电界面,功能层实现了相互连接(产生一个渗透到粘附网络的

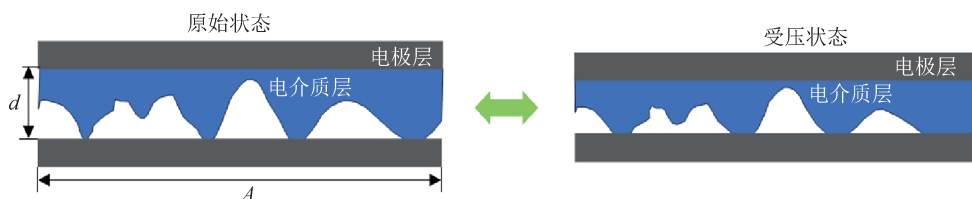


图1 传感器检测原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of sensor detection principle

新网络)以形成坚固的界面。这种结构避免由弯曲引起的机械错配,从而在检测静态压力的同时也能对动态压力进行检测。

2 传感器制备与封装

2.1 PDMS-CNTs 电极材料的制备

器件制备与组装工艺流程如图2所示。首先,将PDMS(重量为5 g)和CNTs(重量为0.35 g,纯度为95%,直径为10~20 nm,长度为10~30 μm)通

过超声法+搅拌分散在三氯甲烷(体积为50 mL,纯度为99%)中5 h。再将PDMS与固化剂(固化剂比为5:1)直接混合,形成均匀的PDMS-CNTs溶液;然后将溶液浇铸在特定的模具上。待三氯甲烷蒸发后,将脱气后的PDMS-CNTs复合材料在80 $^{\circ}\text{C}$ 下固化2 h,厚度约为100 μm 。对于电介质,将未固化的PDMS-CNTs溶液浇铸在反向模板上,CNT与PDMS的重量比控制在2 wt.%,厚度为100 μm 。

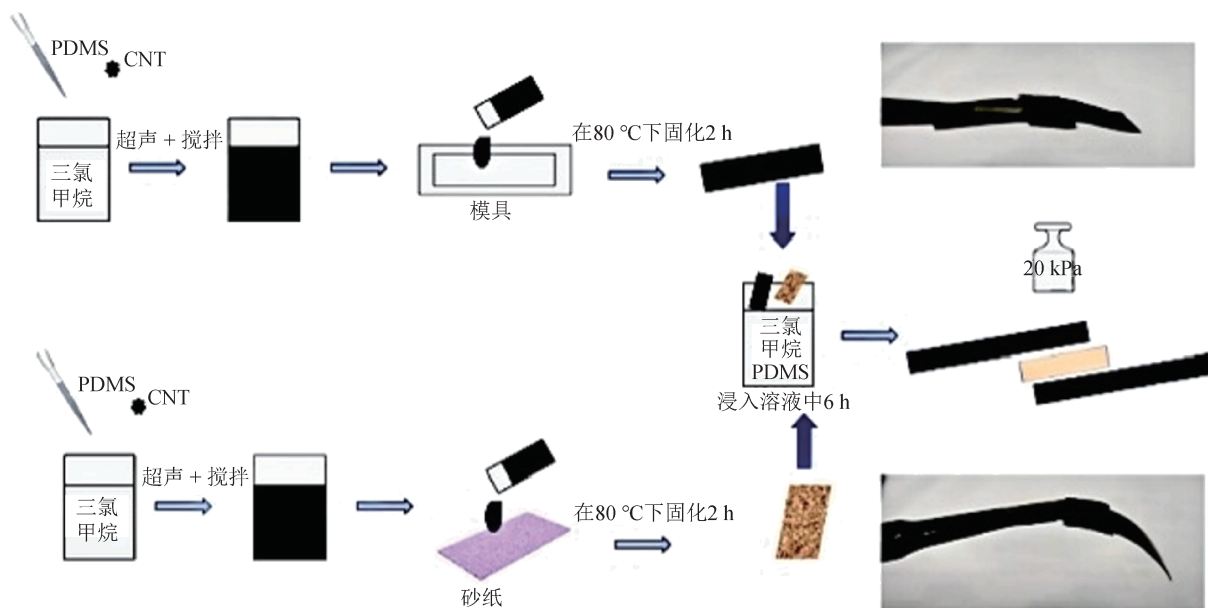


图2 器件制备与组装工艺流程

Fig.2 Process flow of device preparation and assembly

2.2 PDMS-CNTs 电介质层材料的制备

先将PDMS(重量为5 g)和CNTs(重量为0.1 g,纯度为95%,直径为10~20 nm,长度为10~30 μm)通过超声法+搅拌分散在三氯甲烷(体积为50 mL,纯度为99%)中5 h;再将PDMS与固化剂(固化剂比为5:1)直接混合,形成均匀的PDMS-CNTs溶液,接着以砂纸为模具进行倒模。待三氯甲烷蒸发后,将脱气后的PDMS-CNTs复合材料在80 $^{\circ}\text{C}$ 下固化2 h。

2.3 传感器制备

首先将PDMS碱(重量为10 g)和固化剂(重量为2 g)加入三氯甲烷(体积为100 mL)中;接着将混合物超声处理30 min形成溶液;然后将预先制备的电极和介电层在室温下浸入溶液中6 h进行溶胀;之后再膨胀的顶部电极、微结构电介质、

底部电极依次堆叠并在20 kPa的压力环境下受压,以便固化形成键合界面;最后,将由顶部电极、微结构电介质、底部电极固化键合后形成的传感器初样件切割成10 mm $\times$ 10 mm的尺寸,用于后续测试验证。

具体的器件结构如图3所示。从上到下依次为PDMS-CNTs电极层(7 wt. %)、砂纸复刻PDMS-CNTs电介质层(2 wt. %)、PDMS-CNTs电极层(7 wt. %)的“三明治”结构组成。

3 实验验证

3.1 静态压力性能验证

如图4所示,将数显式推拉力计(型号为SC-50 N,满量程为0~50 N,最小分辨力为0.01 N)安装在电动升降位移台(型号为Zolix PA050,最大

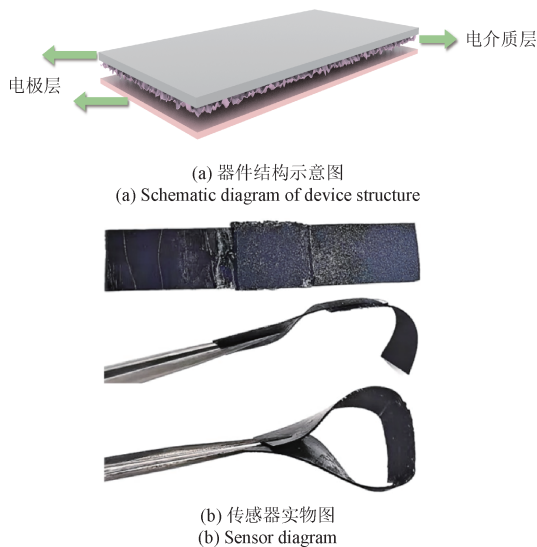


图3 柔性压力传感器
Fig.3 Flexible pressure sensor

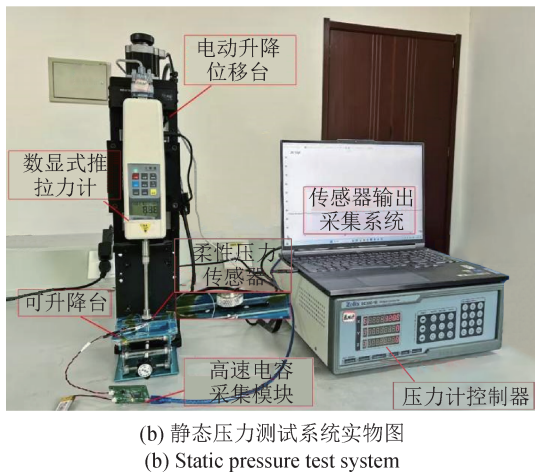
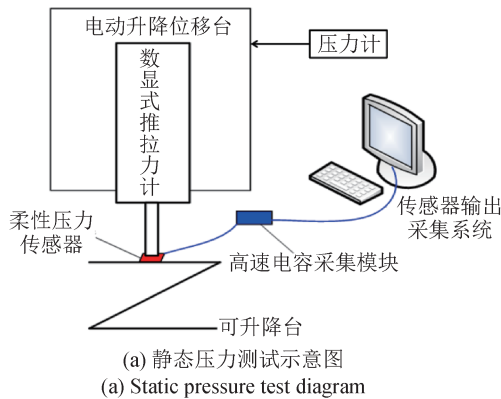


图4 静态压力性能测试验证

Fig.4 Static pressure performance test verification

行程为 50 mm，重复定位误差小于 3 μm)上，传感器放置在可升降台上，将高速电容采集模块外接传感器输出采集系统。通过压力计控制器(型号为 Zolix SC300-1B)控制电动升降位移台的高度，使

数显式推拉力计将力作用于传感器上，读取每一个施加力值对应的传感器输出，并将力值转换为压力记录，如表 1 所示。

表 1 不同压力下传感器的输出响应
Tab.1 Output response of sensors under different pressures

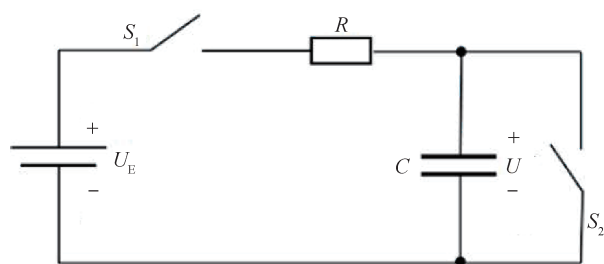
压力 / kPa	传感器输出电容值 / pF			
	第一次	第二次	第三次	平均值
0.00	33.23	32.89	32.06	32.73
0.10	33.30	33.19	32.31	32.93
10.00	40.13	38.36	39.97	39.49
20.00	48.87	46.39	47.18	47.48
40.00	60.44	59.46	60.16	60.02
60.00	75.69	74.51	75.71	75.30
80.00	88.18	86.66	87.57	87.47
100.00	101.43	102.26	101.83	101.84
104.90	104.86	105.71	105.31	105.29

高速电容采集模块如图 5 所示，电路部分使用 STM32F103C8T6 芯片作为中央调度器。高速电容采集模块主要由电源、量程切换、电容测量、单片机、高速通信 5 个模块组成，连续获取电容信号，然后通过串口将传感器输出发送到 PC 端传感器输出采集系统。

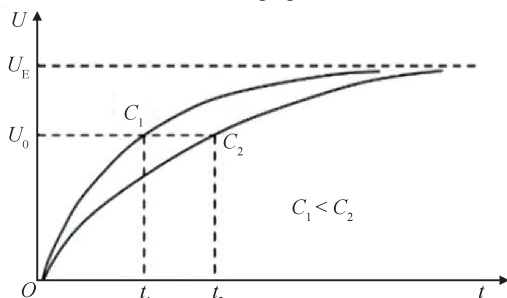
将传感器连接检测电路，测试其压力输入下的电容响应，传感器对不同压力的响应曲线如图 6 所示。由式(1)，可计算灵敏度 $S = (\Delta C / C_0) / p_{FS}$ ，其中， ΔC 为满量程压力响应对应的传感器电容输出变化量， C_0 为传感器初始电容输出， p_{FS} 为满量程压力响应。结果表明：传感器能检测 100 kPa 以上的压力，灵敏度 S 为 0.021 kPa^{-1} ，且当压力响应在 0.1 ~ 104.9 kPa 时，传感器具有良好的线性度，线性度 R^2 超过 0.999。

3.2 动态压力性能验证

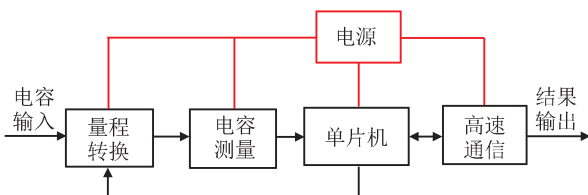
参考 JJF 1370-2012 《正弦法力传感器动态特性校准规范》的测试方法，采用振动结合压力测试的方式，对柔性压力传感器的动态压力性能进行验证，如图 7 所示。将传感器和标准加速度传感器安装在标准激励源上，利用振动传感器的压电



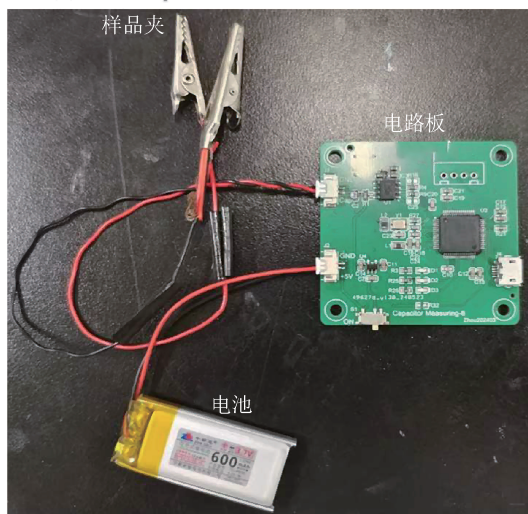
(a) 电容器充放电电路原理图
(a) Schematic diagram of capacitor charging and discharging circuit



(b) 电容值与充电时间的对应关系
(b) The correspondence between capacitance value and charging time



(c) 电容测量电路
(c) The capacitance measurement circuit



(d) 电路模块实物图
(d) Circuit module physical diagram

图5 高速电容采集模块

Fig.5 High speed capacitor acquisition module

效应与数据采集处理方法,对采集到的振动频率信号和加速度信号进行分析。其中,标准激励源(型号为4808,频率为5~5 000 Hz,加速度小于等

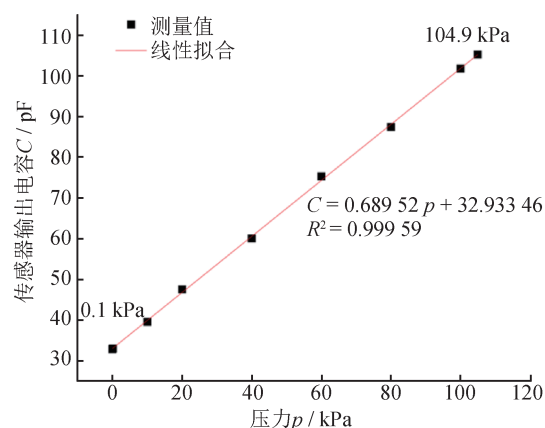
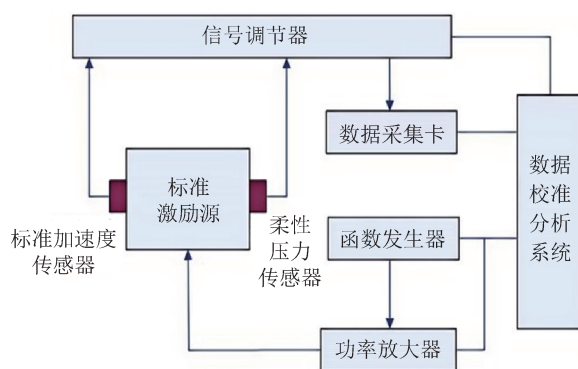


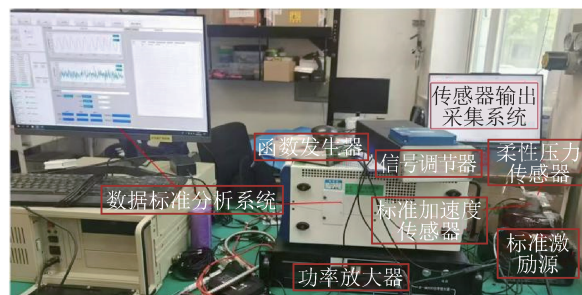
图6 传感器对不同压力的响应曲线

Fig.6 Response curves of the sensor to different pressures



(a) 动态压力测试示意图

(a) Schematic diagram of dynamic pressure testing



(b) 动态压力测试系统实物图

(b) Dynamic pressure test system

图7 动态压力性能测试验证

Fig.7 Dynamic pressure performance test verification

于71 g),信号调节器(型号为2692,频率为0.1 Hz~100 kHz),函数发生器(型号为GFG-8255A,频率为0.5 Hz~5 MHz),功率放大器(型号为2712,频率为5~5 000 Hz,加速度小于等于71 g)。

对传感器动态压力性能验证时需要提供预紧力,但传感器比较轻薄,且没有刚性连接部位,如果在传感器上放置具有一定质量的物块提供预紧力,则存在不稳定的弊端,且在振动器工作时

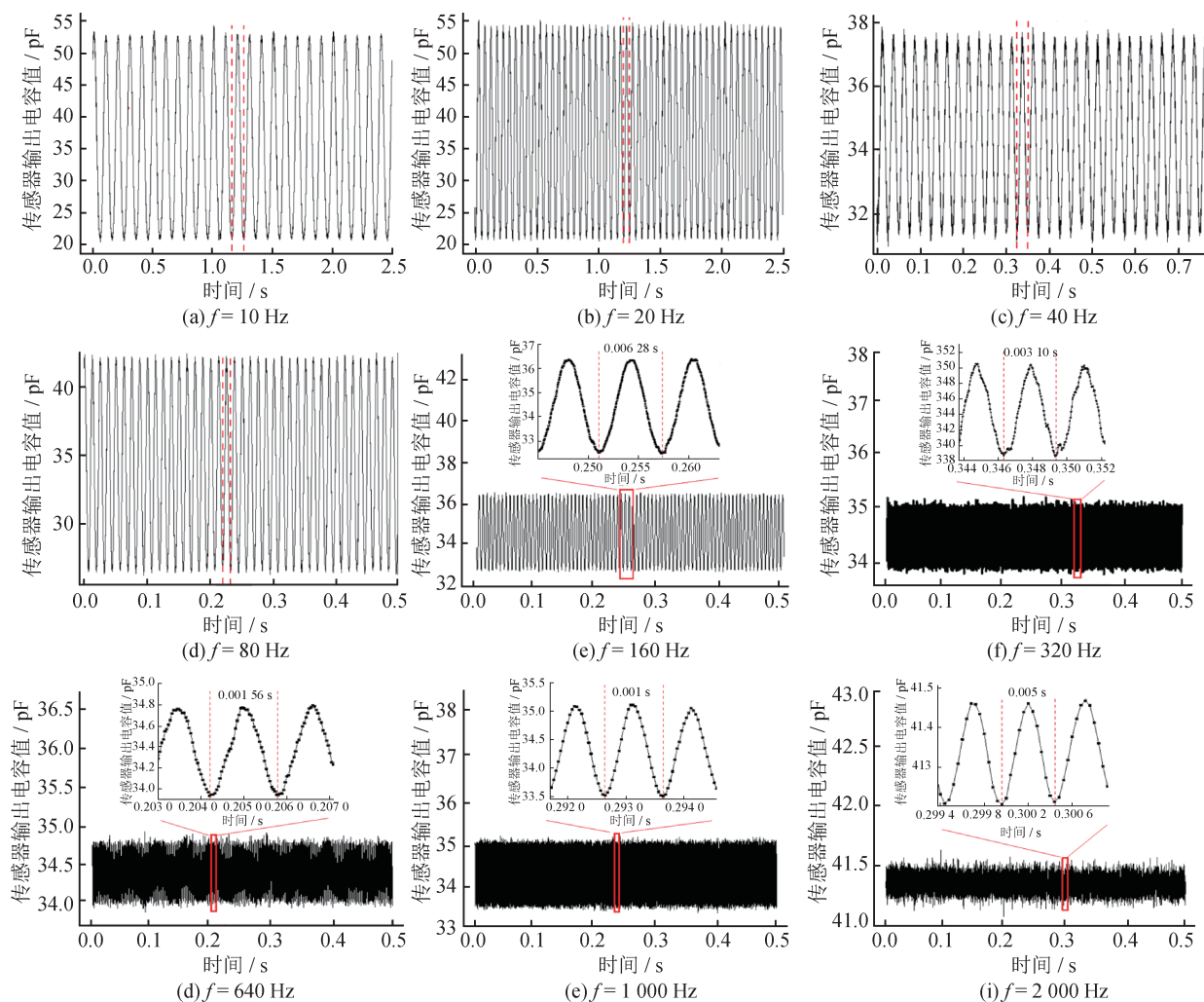


图8 传感器对不同振动频率的动态压力响应曲线

Fig.8 Dynamic pressure response curve of the sensor to different vibration frequencies

该物块会掉下。因此,采用胶带固定的方式提供预紧力,将柔性压力传感器固定在振动器上,选择的预紧力大小为静态压力满量程的10%。

验证传感器对不同振动频率的响应,结果如图8所示。在10~2000 Hz的振动频率下,传感器有着良好的动态压力响应,传感器的输出会随着振动发生器(产生正弦波的振动变化)的振动信号变化而变化。不同的振动频率下,传感器都有着良好的正弦波输出,输出信号的正弦波频率与振动发生器的频率能够很好地吻合,这表明所制备的传感器可以很好地检测动态压力的信号。

此外,使用测试系统验证了传感器在不同加速度和频率检测范围下的动态压力性能,传感器可以实现标准振动(160 Hz)下不同加速度信号的动态响应。如图9所示,检测了不同标准加速度值下

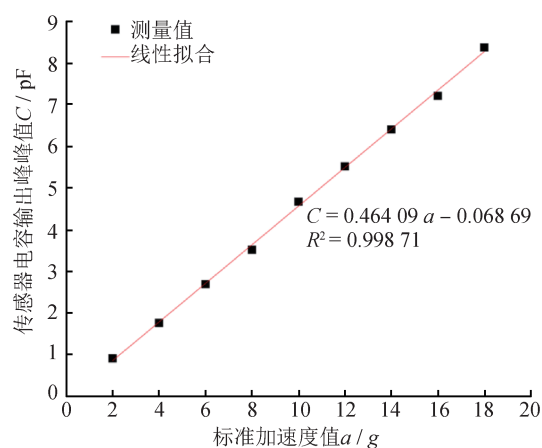


图9 传感器对不同加速度的动态输出响应曲线(160 Hz)

Fig.9 Dynamic output response curve of the sensor to different accelerations (160 Hz)

的电容信号变化,传感器动态灵敏度 S' 为 $0.447 g^{-1}$ ($S' = (\Delta C'/C_0)/a_{FS}$, 其中, $\Delta C'$ 为满量程加速度响

应对应的传感器电容输出变化量， C_0 为传感器初始电容输出， a_{FS} 为满量程加速度响应)。在振动频率不变的情况下，随着标准加速度值的增加，传感器输出的电容值的峰峰值也随之增加。并且，电容信号峰峰值与标准加速度值曲线具有优异的线性度， R^2 系数超过0.998。

传感器在不同温度下的输出响应结果如图10所示。在25~60℃时，传感器的输出电容变化 $\Delta C/C_0$ 基本保持不变，即温度响应稳定。

将本文研制的传感器与现有文献所报道的基

于PDMS介电层的柔性电容式压力传感器静/动态性能进行比较，结果如表2所示。

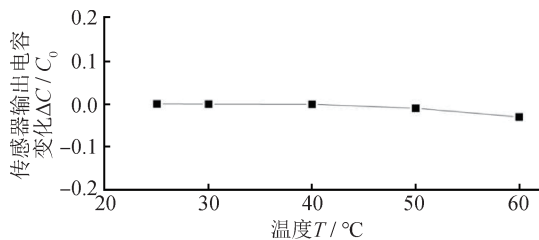


图10 传感器在不同温度下的电学特性

Fig.10 Electrical properties of the sensor at different temperatures

表2 基于PDMS介电层的柔性电容式压力传感器性能比较

Tab.2 Performance comparison of flexible capacitive pressure sensors based on PDMS dielectric layer

序号	柔性材料类型	静态压力性能			动态压力性能			温度响应范围 / °C	文献
		压力量程 / kPa	压力检测灵敏度 / kPa ⁻¹	线性度 R ²	振动频率量程 / Hz	加速度检测范围 / g	动态灵敏度 / g ⁻¹		
1	PDMS-CB	0 ~ 18.52	0.012 1	—	—	—	—	—	[15]
2	PDMS-TPU	0 ~ 120	1.58 (0 ~ 40 kPa)、 6.21 (40 ~ 120 kPa)	—	0.07 ~ 0.26 (38.2 kPa)	—	—	—	[16]
3	PDMS-3DNE	0 ~ 100	10.2 (0 ~ 8.6 kPa)、 3.65 (8.6 ~ 100 kPa)	—	100 ~ 1 000	—	—	—	[17]
4	PDMS-TrFE	0 ~ 100	4.05 (0 ~ 1 kPa)	—	—	—	—	—	[18]
5	PDMS-rGO	0 ~ 33	0.627	—	—	—	—	—	[19]
6	PDMS-CB/CNTs	0 ~ 530	0.34 (10 ~ 100 kPa)	0.980 ~ 0.993	—	—	—	25 ~ 70	[20]
7	PDMS-ITO/PET	0 ~ 150	0.124 (0 ~ 15 kPa)	—	—	—	—	—	[21]
8	PDMS-CNTs	0 ~ 350	0.041	—	0 ~ 12 500	—	—	—	[22]
9	PDMS-CNTs	0 ~ 104.9	0.021	0.999	10 ~ 2 000	0 ~ 18	0.447(对应振 动频率 160 Hz)	25 ~ 60	本文

4 结论

针对飞行器所处的动态环境，研制了一款由PDMS-CNTs材料系统制成的、具有粘合互连接口的柔性电容式压力传感器。通过控制PDMS中CNT的浓度，将复合材料的功能调整为介电层或电极层。所研制的传感器能检测100 kPa以上的静态压

力，且在0.1~104.9 kPa范围内的静态压力响应具有良好的线性度，灵敏度为0.021 kPa⁻¹， R^2 系数超过0.999；同时，在10~2 000 Hz的振动频率下，传感器均有良好的动态压力响应，且传感器动态压力输出与标准加速度值(160 Hz标准频率下)具有优异的线性关系， R^2 系数超过0.998；此外，传感器在25~60℃温度范围内，其输出电容

变化基本保持不变, 具有较好的温度稳定性。

面向航空航天领域的精细化测试需求, 针对飞行器所处的宽压力分布范围、高低温变化、强辐射复杂环境, 柔性压力传感器会向高灵敏度、宽量程、高稳定性与可靠性的方向发展。现阶段, 针对柔性压力传感器在飞行器复杂环境下的应用, 需解决传感器粘贴固定的问题, 使其能够经受高速来流的强冲击。此外, 针对飞行器复杂曲面结构的参数测量, 可通过将柔性压力传感器与其他类型的传感器(如传统的刚性压力传感器、振动传感器、温度传感器)集成的方式, 形成多传感器测量系统, 为飞行器的精细化测试提供更加全面、准确的数据。

参考文献

- [1] 于江涛, 孙雷, 肖瑶, 等. 压阻式柔性压力传感器的研究进展[J]. 电子元件与材料, 2019, 38(6): 1-11.
YU J T, SUN L, XIAO Y, et al. Progress in the research of piezo-resistive flexible pressure sensor[J]. Electronic Components and Materials, 2019, 38(6): 1-11. (in Chinese)
- [2] 王杰, 汪滨, 安泊儒, 等. 电容式柔性压力传感器的研究进展[J]. 北京服装学院学报(自然科学版), 2020, 40(1): 81-90.
WANG J, WANG B, AN B R, et al. Progress in the research of capacitance flexible pressure sensor[J]. Journal of Beijing Institute of Fashion Technology (Natural Science Edition), 2020, 40(1): 81-90. (in Chinese)
- [3] 王菲菲. 基于多孔状介质层的电容式柔性压力传感器制备及性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
WANG F F. Preparation and performance of capacitive flexible pressure sensor based on porous dielectric layer [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2022. (in Chinese)
- [4] 余吉宏. 基于力致发光粒子的柔性电容式压力传感器设计[D]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
YU J H. Design of flexible capacitive pressure sensor based on mechanoluminescence materials [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2021. (in Chinese)
- [5] PHUONG P V, TRIET N M, PARK J W, et al. Chlorine-trapped CVD bilayer graphene for resistive pressure sensor with high detection limit and high sensitivity[J]. 2D Materials, 2017, 4 (2). DOI: org/10.1088/2053-1583/aa6390.
- [6] SIVAGNANAPALANI P, SAHOO B, PANDA P K. A study on strontium niobate based piezo-resistive materials for high-temperature and high-pressure sensor applications [J]. ISSS Journal of Micro and Smart Systems, 2019, 8 (1): 25-30.
- [7] PAN J, LIU S, YANG Y, et al. A highly sensitive resistive pressure sensor based on a carbon nanotube-liquid crystal - PDMS composite [J]. Nanomaterials, 2018, 8 (6): 413-421.
- [8] CHEN Z, WANG Z, LI X, et al. Flexible piezoelectric-induced pressure sensors for static measurements based on nanowires / graphene heterostructures [J]. ACS Nano, 2017, 11(5): 4507-4513.
- [9] IIZUKA M, KOBAYASHI M, HASEGAWA Y, et al. A new flexible piezoelectric pressure sensor array for the noninvasive detection of laryngeal movement during swallowing[J]. Journal of Physiological Sciences, 2018, 68(6): 837-846.
- [10] KIM H J, KIM Y J. High performance flexible piezoelectric pressure sensor based on CNTs - doped 0-3 ceramic-epoxy nanocomposites[J]. Materials & Design, 2018(151): 133-140.
- [11] DINH T H N, MARTINCIC E, DUFOUR G E, et al. Capacitive flexible pressure sensor: micro fabrication process and experimental characterization [J]. Microsystem Technologies, 2016, 22 (3): 465-471.
- [12] PENG S, CHEN S, HUANG Y, et al. High sensitivity capacitive pressure sensor with bi-layer porous structure elastomeric dielectric formed by a facile solution based process [J]. IEEE Sensors Letters, 2019, 3(2): 1-4.
- [13] VARMA M A, JINDAL S K. Novel design for performance enhancement of a touch-mode capacitive pressure sensor: theoretical modeling and numerical simulation [J]. Journal of Computational Electronics, 2018, 17(3): 1324-1333.
- [14] WANG J, JIU J, NOGI M, et al. A highly sensitive and flexible pressure sensor with electrodes and elastomeric interlayer containing silver nanowires [J]. Nanoscale, 2015, 7(7): 2926-2932.
- [15] ZHU Y C, WU Y G, WANG G S, et al. A flexible capacitive pressure sensor based on an electrospun polyimide nanofiber membrane[J]. Organic Electronics, 2020, 84. DOI: org/10.1016/j.orgel.2020.105759
- [16] CUI X H, CHEN J W, WU W, et al. Flexible and breath-

- able all-nanofiber iontronic pressure sensors with ultraviolet shielding and antibacterial performances for wearable electronics [J]. *Nano Energy*, 2022, 95. DOI: org/10.1016/j.nanoen.2022.107022.
- [17] ZHANG L, ZHANG S, WANG C, et al. Highly sensitive capacitive flexible pressure sensor based on a high-permittivity mxene nanocomposite and 3D network electrode for wearable electronics [J]. *ACS sensors*, 2021, 6, 2630–2641.
- [18] SU M, FU J T, LIU Z X, et al. All-fabric capacitive pressure sensors with piezoelectric nanofibers for wearable electronics and robotic sensing [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15, 48683–48694.
- [19] PAN S Y, ZHANG T, ZHANG C, et al. Fabrication of a high performance flexible capacitive porous GO/ PDMS pressure sensor based on droplet microfluidic technology [J]. *Lab on a Chip*, 2024, 24:1668–1675. DOI: org/10.1002/adfm.202419049.
- [20] MA Y, LI Z, TU S, et al. An asymmetric interlocked structure with modulus gradient for ultrawide piezocapacitive pressure sensing applications [J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(8). DOI: org/10.1002/adfm.202309792.
- [21] JUNG Y, LEE W, JUNG K, et al. A highly sensitive and flexible capacitive pressure sensor based on aporous three - dimensional PDMS/ microsphere composite [J]. *Polymers*, 2019, 12(6). DOI: org/10.3390/polym12061412.
- [22] ZHANG Y, ZHOU X M, ZHANG Net al. Ultrafast piezo-capacitive soft pressure sensors with over 10 kHz bandwidth via bonded microstructured interfaces [J]. *Nature Communications*, 2024, 15. DOI: org/10.1038/s41467-024-47408-z.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 杨水旺(1976—), 男, 研究员, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究方向为力学计量、极端环境传感技术、自动化技术、仪器仪表工业。