

基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器 敏感机理的研究

张永豪, 朴林华, 孙嘉浩

(北京信息科技大学 北京市传感器重点实验室, 北京 100192)

摘要: 该文提出了一种基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器结构, 并研究了其敏感机理。通过 COMSOL 建立三维模型结构, 计算了敏感结构内的温度场。计算结果表明, 基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的输入压强与输出电压成反比例关系, 当压强为 0~500 kPa 时, 传感器灵敏度为 -0.205 mV/kPa, 非线性度为 6.161%; 当压强为 525~740 kPa 时, 传感器灵敏度为 -4.937 mV/kPa, 非线性度为 9.628%。

关键词: 温压一体柔性传感器; 微机械; 有限元分析; 高鲁棒性; 敏感机理

中图分类号: TN37 **文献标识码:** A

Mechanism of High-Robustness Flexible Sensor for Temperature and Pressure Integration Based on Heat Conduction

ZHANG Yonghao, PIAO Linhua, SUN Jiahao

(Beijing Key Laboratory for Sensor, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: In this paper, we propose a high-robustness, temperature-pressure integrated flexible sensor based on heat conduction and analyze its underlying mechanism. A three-dimensional model was established using COMSOL, and the temperature field in the structure was calculated. The results show that the input pressure is inversely proportional to the output voltage of the proposed sensor. The sensitivity is -0.205 mV/kPa in the range of 0-500 kPa with a nonlinearity of 6.161%. Likewise, the sensitivity is -4.937 mV/kPa in the range of 525-740 kPa with a nonlinearity of 9.628%. We describe the underlying mechanism of the sensor, providing a theoretical foundation for optimizing its parameters and structure.

Key words: flexible sensor integrating temperature and pressure; micromachining; finite element; high robustness; sensitive mechanism

0 引言

温压一体柔性传感器是一种可同时测量温度和压力的传感器, 集成了温度和压力敏感元件, 能同步测量温度与压力, 具有精度高、稳定性好及功耗低等优点, 适用于各种环境, 尤其是需要同时监测温压的场合。目前, 高性能和结构简易的柔性多功能传感器成为研究重点^[1]。

随着柔性电子技术的发展, 温压一体柔性传感器广泛应用于医疗监测、运动监测和智能服装等领域^[2]。2010年, 合肥工业大学黄英等^[3]制作了一种温度压力传感器, 有效增大了压力和温度的测量范

围。2014年, 东南大学雷东提出了一种新型电感传感器, 该结构将3个用于测量温度、压力和相对湿度的电容传感器链接到堆叠式电感器上, 可实现多功能同时测量^[4]。2014年, 大阪府立大学的 Harada 等^[5]提出了一种电子晶须状结构的全打印高灵敏度多功能智能柔性温度压力传感器, 可通过阵列方式实时测量施压大小和温度高低。2015年, 韩国成均馆大学 Ho 等^[6]提出了一种可拉伸多模态全石墨烯的柔性温压一体传感器, 其压力测量范围为 0~450 kPa, 超过 10 kPa 时压力灵敏度为 0.002 kPa⁻¹。2017年, 赵帅等提出了一种同时独立感知压力和温度的柔性温压一体传感器^[7], 其在 1.2 kPa 以下和

收稿日期: 2024-10-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771060); 北京市教育委员会科研计划项目资助(KZ20231123221); 北京市新世纪百万人才工程培养资助项目(2019A20); 现代测控技术教育部重点实验室资助(2024202101); 北京信息科技大学北京市传感器重点实验室资助(2024202108)

作者简介: 张永豪(2000-), 男, 山东省日照市人, 硕士。

1.2 kPa 以上的灵敏度分别约为 0.38 V/kPa 和 0.015 V/kPa。2018 年,浦项科技大学 Bae 等^[8]提出了一种具有可识别性和线性敏感性的压力温度感知双峰电子皮肤,压力量程范围为 0~30 kPa,压力灵敏度可达到 0.7 kPa⁻¹。2019 年,李宁^[9]提出了一种柔性温度压力传感器,其在 0~180 m·N 时线性度为 2.39%,灵敏度为 0.20%/(m·N);在 180~600 m·N 时非线性度为 3.83%,灵敏度为 0.007 1%/(m·N)。2019 年,Jung 等^[10]采用 PET/ITO 导电膜和金字塔形 PDMS 组装成堆叠层状结构并制备了温度压力传感器,传感器在 100 Pa~10 kPa 压强范围内具有出色的灵敏度。2019 年,Wang 等采用静电纺丝技术制备了两层 SBS 纤维,在纤维上分别涂覆银纳米颗粒和 PEDOT:PSS,将两层纤维结构交错贴合可得到柔性温压一体化传感器,该传感器具有高达 1 185.8 kPa⁻¹ 的超高压响应灵敏度^[11]。2021 年,吉林大学薛兆康等^[12]提出了一种基于碳纤维管增敏型光纤光栅温度压力传感器,以碳纤维丝编织成的中空管状结构作为骨架,通过耐高温环氧树脂固化成复合碳纤维管作为弹性体,并将表面嵌入耐高温光纤布喇格光栅作为感知元件,实现了井下温度和压力的同时测量。2021 年,刘坤林^[13]提出了一种柔性温压一体化传感器,该传感器响应呈分段线性特征,在 0~300 kPa 压强范围内非线性度分别为 0.47% 和 1.75%,灵敏度为 0.049 3 kPa⁻¹ 和 0.004 1 kPa⁻¹。

基于上述所提到的温压一体柔性传感器结构,经分析发现,大多结构抗压性及稳定性较差,可承受低压强范围下的载荷,而在高压强载荷下,传感器易发生损坏,测量精度受影响较大,导致灵敏度下降。针对上述问题,本文提出了一种基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的敏感结构。该结构具有较高的灵敏度和较大范围的压强量程,通过 COMSOL 建立其有限元模型,分析在有无压强时温度场的变化情况,给出输入压强与输出电压的比例关系,验证该结构的敏感机理。

1 结构原理

如图 1 所示,基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器由柔性基层层(PI)和受压多孔弹性体(PDMS)两部分组成。柔性基层层上设置有压强检

测电阻薄膜(R_1)和环境温度检测电阻薄膜(R_2),其中压强检测电阻薄膜也作为热源。该传感器的电阻薄膜(R_1 、 R_2)与受压多孔弹性体(PDMS)对称分布在柔性基层层的上表面。该传感器剖视图如图 2 所示。

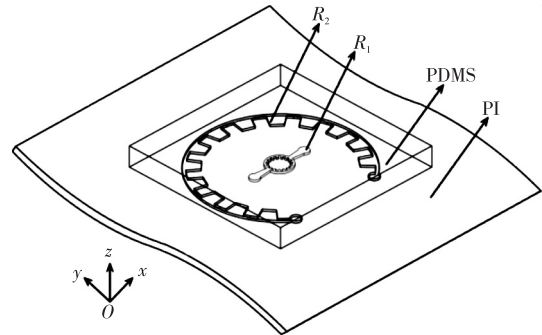


图 1 基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的三维结构示意图

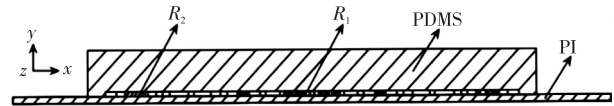


图 2 基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的剖视图

图 3 为环境温度检测原理示意图。由图可见,基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的温度传感技术采用了热电阻式,并基于金属热效应进行了温度测量,环境温度检测电阻薄膜 R_2 阻值随温度的变化而改变,所以检测到温度热电阻阻值变化即可检测出温度。对其通入恒压电,通过测量仪器检测电流变化,计算得到电阻的变化,检测到输入温度变化,输入温度和电阻成正比,即为环境温度检测电阻薄膜 R_2 的工作原理。

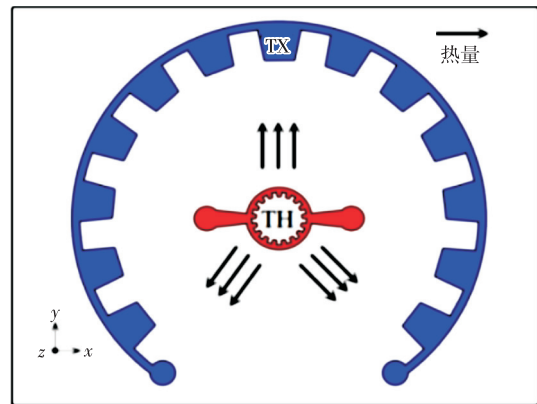


图 3 环境温度检测原理示意图

图 4、5 分别为无、有压强时温度场变化示意图。由图 4 可见,当无压强输入时,PDMS 无变形,压强检测电阻薄膜 R_1 通电加热后,其温度通过 PDMS

进行扩散, R_1 与 R_2 产生温差。由图 5 可见, 当有压强输入时, PDMS 被压缩而发生变形, 压强检测电阻薄膜 R_1 往外扩散的热量增大, 压强与扩散的热量成正比关系, 孔隙率和厚度减小, 压强与孔隙率和厚度成反比。孔隙率和厚度与导热能力成反比, 所以孔隙率与厚度减小, 而导热能力增大, 进而压强检测电阻薄膜向外界扩散更多的热量, 其自身温度降低, 致使 R_1 与 R_2 间的温差减小^[2], 导热能力与温度扩散热量成正比。导热能力的增加使温差降低, 导热能力与温差成反比例关系。因此, 输入压强与输出温差成反比例关系, 这就是压强检测电阻薄膜 R_1 的工作原理。

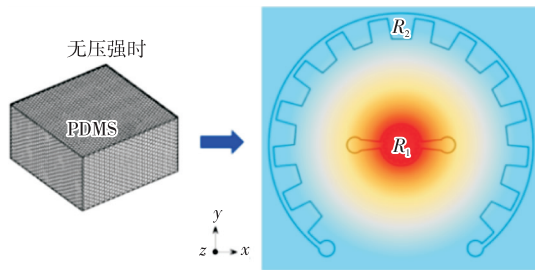


图 4 无压强时的温度场变化示意图

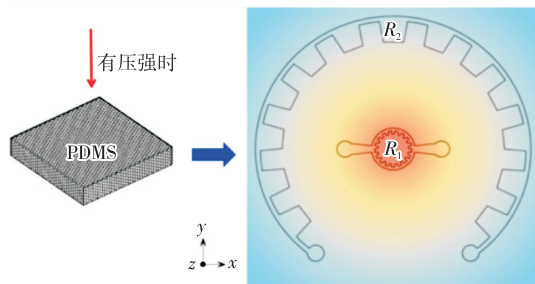


图 5 有压强时的温度场变化示意图

图 6 为传感器输出电路。由图可见, 温度变化会使铂电阻阻值发生改变^[14], 设初始电阻阻值为 R_0 , 施加不同的压强可得到对应的温差, 由此可得到不同温度下 R_1 、 R_2 的阻值, 以及不同压强下对应的温差和输出电压间的关系:

$$R_1 = R_0(1 + AT_1) \quad (1)$$

$$R_2 = R_0(1 + AT_2) \quad (2)$$

$$V_{\text{out}} = A\alpha V_{\text{cc}} \frac{RR_0}{(R + R_1)(R + R_2)} \Delta T \quad (3)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为压强检测电阻薄膜和环境温度检测电阻薄膜的温度值; A 为温度系数; α 为差分放大器的放大倍数; V_{cc} 为输入电源电压; R 为参考电阻值。

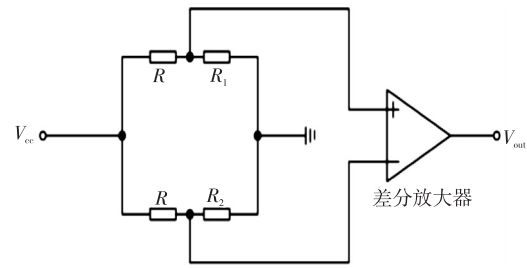


图 6 传感器输出电路

根据上述所提及的原理及公式, 需要对该温压一体柔性传感器的输入压强、孔隙率、输出温差及输出电压之间的关系进行计算推导。该温压一体柔性传感器的输入压强与孔隙率关系为

$$F = PB \quad (4)$$

$$\sigma = -\frac{F}{B} \quad (5)$$

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

$$\Delta D = -D_0 \frac{F}{BE} \quad (7)$$

$$D_n = D_0 \left(1 - \frac{F}{BE}\right) \quad (8)$$

$$\rho_n = 1 - (1 - \rho_0) \frac{D_0}{D_n} \quad (9)$$

式中: P 为输入压强; σ 为应力; F 为输入压力; B 为受力面积; ϵ 为应变; E 为 PDMS 的弹性模量; ΔD 为厚度变化量; ρ_n 为受压后的孔隙率^[15]; ρ_0 为原始孔隙率; D_0 为原始厚度; D_n 为受压后的厚度。表 1 为基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的初始参数值表。表中 L 为受压多孔弹性体的长度, W 为受压多孔弹性体的宽度, P_0 为热耗率。

表 1 高鲁棒性温压一体柔性传感器的初始参数

初始参数名称	初始参数值
E/kPa	750
$\rho_0/\%$	98.8
D_0/mm	1
L/mm	9
W/mm	9
B/mm^2	81
P_0/W	0.05

由于孔隙率与输出温差的定量关系无法直接

通过公式推导得到,故需要使用有限元法进行计算。

2 有限元计算

2.1 物理模型

所提出的基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器结构,其具有高对称性和受压均匀的力学响应性。为了提升设计效率并降低结构复杂度,对该结构进行简化,得到该传感器的三维物理模型如图 7 所示。

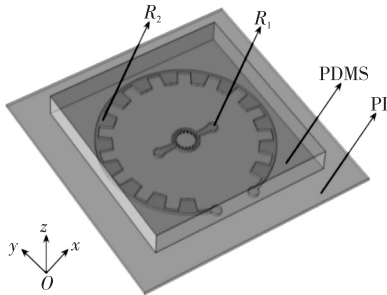


图 7 基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的三维物理模型示意图

2.2 数学模型

基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器内部的物体传热和温度变化过程符合能量守恒方程和傅里叶定律方程:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{v} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q \quad (10)$$

$$\mathbf{q} = -k \cdot \nabla T \quad (11)$$

式中: ρ 为气体密度; C_p 为恒压热容; \mathbf{v} 为气体流速; ∇T 为温度梯度; \mathbf{q} 为热通量矢量; Q 为热源矢量; k 为导热系数。

2.3 有限元法求解

通过 COMSOL 软件对不同输入压强下的输出温差进行有限元计算,步骤如下:

1) 几何。创建基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的有限元物理模型。

2) 物理场。选择多孔介质传热物理场,热源中热耗率设置见表 1。

3) 材料。选择多孔材料。

4) 输入压强与孔隙率关系方程。将式(4)-(5)输入到全局定义下的参数模块中,输入所要计算的压强值,可得到对应的压力与应力。将式(9)导入

多孔材料中,输入压强变化可改变 PDMS 的厚度和孔隙率。

5) 对模型参数进行设置,包括所要施加的压强、受压多孔弹性体的弹性模量、敏感元件的尺寸参数和受力面积等。

6) 计算。输入施加的压强值可得到对应的孔隙率,并在此基础上进行计算。

3 计算结果和讨论

在模拟分析中设置环境温度为 293.15 K,基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的输入压强范围为 0~740 kPa。图 8-10 分别为受压多孔弹性体在不同压强(0、370 kPa 和 740 kPa)下温度场的变化情况。

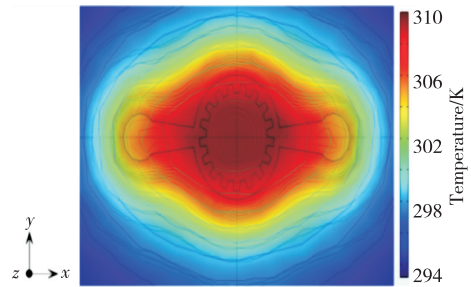


图 8 压强为 0 时的温度场变化图

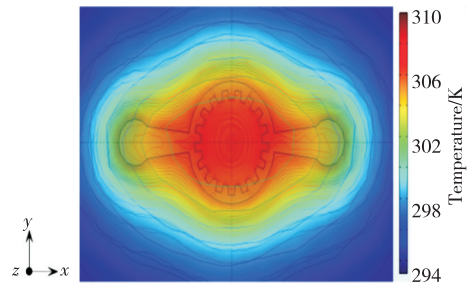


图 9 压强为 370 kPa 时的温度场变化图

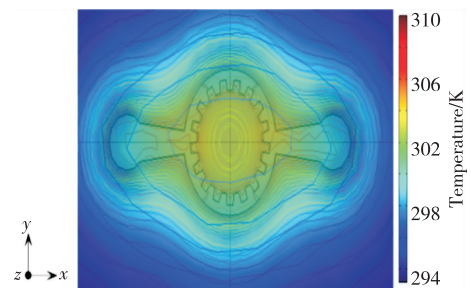


图 10 压强为 740 kPa 时的温度场变化图

由图 8-10 可知,压强为 0、370 kPa 和 740 kPa 时,对应的输出温差分别为 14.586 K、13.315 K、7.245 K。由有限元计算结果可见,输入压强越大,

则输出温差越小。随着输入压强的增大,压强检测电阻丝往外扩散的热量增多,压强与扩散热量成正比。PDMS被压缩,孔隙率和厚度减小,压强与孔隙率和厚度成反比。孔隙率和厚度与导热能力成反比,导热能力随着孔隙率和厚度的减小而增大,进而压强检测电阻薄膜向外扩散更多热量,压强检测电阻薄膜自身温度降至更低,导热能力与压强检测电阻薄膜往外扩散的热量成正比例关系。导热能力的增大,加大了压强检测电阻薄膜热量的扩散,压强检测电阻薄膜与环境温度检测电阻薄膜的温差降低,导热能力与温差成反比例关系。压强检测电阻薄膜与环境温度检测电阻薄膜之间的温差随着压强增大而减小。因此,压强与温差成反比例关系。

基于0~740 kPa的有限元计算结果,将输入压强与输出温差进行拟合,拟合曲线如图11所示。图12、13分别为输入压强在0~500 kPa和525~740 kPa时与输出温差的拟合曲线图。

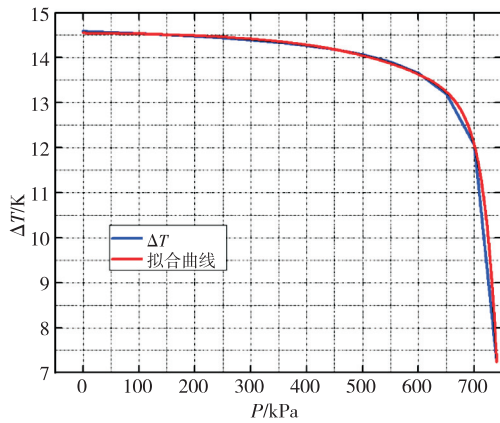


图11 压强(0~740 kPa)与温差的拟合曲线图

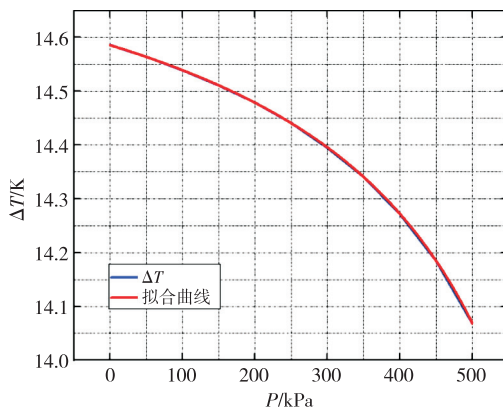


图12 压强(0~500 kPa)与温差的拟合曲线图

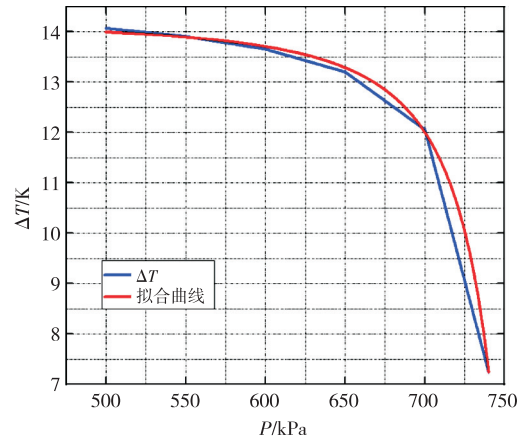


图13 压强(525~740 kPa)与温差的拟合曲线图

基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器输入压强为0~740 kPa时,输入压强与输出温差的拟合曲线方程关系为

$$\Delta T = y_0 + A_1 e^{-P/t_1} + A_2 e^{-P/t_2} + A_3 e^{-P/t_3} \quad (12)$$

式中: ΔT 为传感器的输出温差; P 为向传感器施加的压强,即为输入压强; $y_0 = 14.589, A_1 = -0.046, A_2 = -1.98137 \times 10^{-14}, A_3 = 0.0148, t_1 = -176.084, t_2 = -22.283, t_3 = -176.085$ 。

将式(12)与式(3)联立求解,最终得到该传感器的电路输出电压 V_{out} 为

$$V_{out} = A\alpha V_{cc} \frac{RR_0}{(R+R_1)(R+R_2)} \cdot (y_0 + A_1 e^{-P/t_1} + A_2 e^{-P/t_2} + A_3 e^{-P/t_3}) \quad (13)$$

由式(13)可得到该温压一体柔性传感器输入压强与输出电压的拟合曲线。图14、15分别是输入压强为0~500 kPa和525~740 kPa时与输出电压的拟合曲线图。

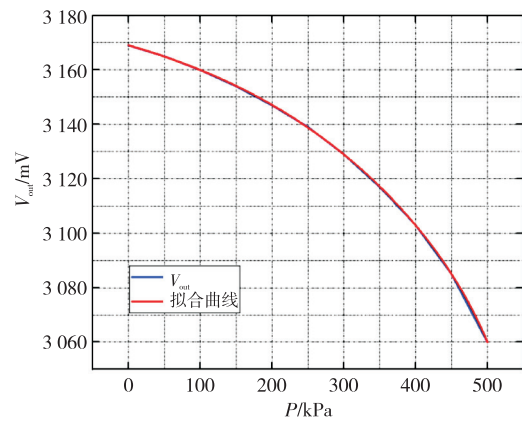


图14 压强(0~500 kPa)与输出电压的拟合曲线图

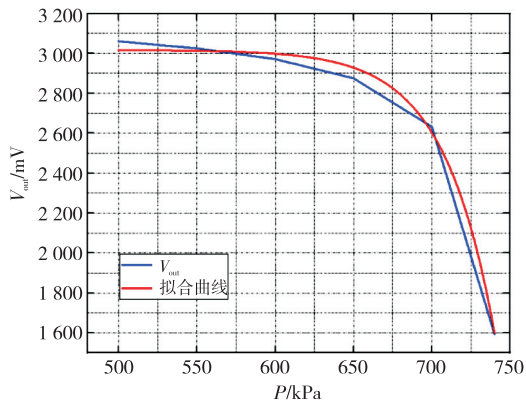


图 15 压强(525~740 kPa)与输出电压的拟合曲线图

通过图 14-15 可得该传感器输入压强与输出电压的拟合曲线图,计算该传感器的灵敏度,判断输入压强在 0~500 kPa 和 525~740 kPa 时传感器性能,所求灵敏度(即斜率)为

$$V_{\text{out}} = kP + b \quad (14)$$

式中: V_{out} 为输出电压; k 为斜率; b 为截距; P 为输入压强。

由式(14)求解可知,当输入压强为 0~500 kPa 时, $k = -0.205$, $b = 3181.091$;当输入压强为 525~740 kPa 时, $k = -4.937$, $b = 5770.272$ 。由图 14 可见,输出电压变化相对缓和,而图 15 中输出电压变化较为灵敏。

4 结束语

本文提出了一种基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器,并介绍了该传感器的结构、原理、有限元计算方法和敏感机理。基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器由柔性基底层和受压多孔弹性体两部分组成,柔性基底层上设置一个压强检测电阻薄膜和一个环境温度检测电阻薄膜。同时,利用 COMSOL 对该传感器进行了三维物理建模,并对输入压强与输出温差的定量关系进行有限元计算,分析对比了不同压强下温差的变化情况,对输入压强与输出温差的敏感机理进行了探讨。计算结果表明,温差随着压强的增大而减小,压强与温差成反比例关系。通过压强、温差的拟合公式与惠斯通电桥公式联立得到输入压强与输出电压的定量关系,并绘制拟合曲线,最终得到输入压强与输出电压成反比例关系。基于热传导的高鲁棒性温压一体柔性传感器的输入压强在 0~500 kPa 的灵敏度为 -0.205 mV/kPa ,非线性度为 6.161%,输入压强在 525~740 kPa 的灵敏度为 -4.937 mV/kPa ,非

线性度为 9.628%。该传感器可应用于医疗、消费电子、工业控制和机器人等领域。

参考文献:

- [1] PANG C, LEE C, SUH K Y. Recent advances in flexible sensors for wearable and implantable devices [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 130(3): 1429-1441.
- [2] 王宁. 基于天然木纤维/PEDOT/PSS 的高灵敏度温压一体化传感器研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [3] 黄英, 刘平, 赵兴, 等. 压力/温度复合柔性触觉传感器用导电橡胶的外场特性[J]. *高分子材料科学与工程*, 2010, 26(12): 95-98.
- [4] HUANG Ying, LIU Ping, ZHAO Xing, et al. External field characteristics of the conductive rubber used as the multi-pressure-temperature flexible tactile sensor[J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2010, 26(12): 95-98.
- [5] DONG Lei, WANG Lifeng, REN Qingying, et al. Mutual inductance suppressed stacked inductors for passive wireless multi-parameter sensors[C]//Valencia, Spain: IEEE SENSORS 2014 Proceedings, 2014: 926-929.
- [6] HARADA S, HONDA W, ARIE T, et al. Fully printed, highly sensitive multifunctional artificial electronic whisker arrays integrated with strain and temperature sensors[J]. *ACS Nano*, 2014, 8(4): 3921-3927.
- [7] HO D H, SUN Qijun, KIM S Y, et al. Stretchable and multimodal all graphene electronic skin[J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(13): 2601-2608.
- [8] ZHAO Shuai, ZHU Rong. Flexible bimodal sensor for simultaneous and independent perceiving of pressure and temperature stimuli [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2017, 2(11): 1700183.
- [9] BAE G Y, HAN J T, LEE G, et al. Pressure/temperature sensing bimodal electronic skin with stimulus discriminability and linear sensitivity [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(43): e1803388.
- [10] 李宁. 基于 PEDOT/PSS-CNT 和平板电容的柔性温度压力传感器研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.
- [11] JUNG M, VISHWANATH S K, KIM J, et al. Transparent and flexible Mayan-pyramid-based pressure sensor using facile-transferred indium tin oxide for bimodal sensor applications [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 14040.