

基于类蜘蛛网结构的柔性温度传感阵列的设计

谢茂雯¹ 杨高¹ 李俊² 潘建君¹ 张晓金^{1*}

1. 重庆电力高等专科学校 信息工程学院 重庆 400053

2. 大明电子(重庆)有限公司 重庆 401120

摘要: 针对传统刚性温度传感器在曲面贴合、形变耐受方面的局限性, 本实验制备了一种适用于温度监测的柔性传感器。该传感器以厚度为58 μm 的PI/Cu膜为基材, 通过紫外纳秒激光加工制备了线宽为400 μm 、线间距为400–1600 μm 的梯度化类蜘蛛网导电网络。实验结果表明, 该传感器在25–50 $^{\circ}\text{C}$ 范围内表现出良好的线性温度–电阻特性 ($R^2=0.99$), 且能耐受多次弯折和扭曲形变。有限元模拟进一步验证了设计的八边形结构的最大变形量较五边形降低19.3%。该传感器兼具高贴合性与机械稳定性, 能有效消除因贴合不紧密导致的温度检测误差, 为汽车坐垫温度监测提供更精确、稳定的温度数据反馈。

关键词: 柔性温度传感器; 类蜘蛛网结构; 有限元模拟

引言

近年来, 柔性温度传感器因其可弯曲、轻量化、高环境适应性等特点^[1, 2], 在智能穿戴、医疗监测、智能家居和汽车电子等领域展现出重要应用价值^[3, 4]。相较于传统刚性传感器, 柔性传感器能够与复杂曲面实现紧密贴合, 避免因贴合间隙产生的热传导损耗, 大幅提升温度检测的准确性^[5]; 同时, 良好的形变耐受性使其能适应动态形变环境, 即使经历反复弯折、扭曲或压力变化, 仍可保持导电网络的完整性与信号稳定性, 有效解决了刚性传感器在动态场景下易失效的问题^[6]。然而, 在实际应用中, 不同场景对柔性温度传感器的性能需求存在差异, 尤其是在需要频繁承受机械应力与曲面贴合的场景中, 传感器的抗应变能力与贴合稳定性仍需进一步优化^[7]。例如, 在部分需要与柔性基材(如织物、弹性材料)结合的温度监测场景中, 传感器不仅需紧密贴合基材表面以确保检测精度, 还需承受基材形变带来的持续机械应力, 避免导电网络断裂或信号漂移^[8]。传统柔性传感器虽具备一定柔性, 但在应力分散设计上仍有不足, 面对局部集中应力时易出现性能衰减, 难以满足长期动态监测的需求。因此, 通过结构设计优化提升柔性温度传感器的抗应变能力, 同时保障其温度传感精度具有重要意义。

针对上述挑战, 本研究提出了一种类蜘蛛网结构的柔性温度传感器, 采用紫外纳秒激光加工技术在PI/Cu

膜(聚酰亚胺覆铜膜)上制备了线间距由内向外逐渐变宽(400–1600 μm)的类蜘蛛网导电图案。通过有限元模拟的方法, 研究了结构参数与传感器性能的关系。结果表明, 多边形边数的增加能够有效分散机械形变产生的应力, 减小最大变形量; 同时, 传感器在25–50 $^{\circ}\text{C}$ 范围内表现出高线性度的温度–电阻特性 ($R^2=0.99$), 且能耐受多次弯折和扭曲形变。这一设计不仅解决了传统传感器贴合性差的问题, 还通过优化结构参数提升了机械稳定性。在未来实际应用中, 可为汽车坐垫智能温控系统提供精准数据支持, 从而提升驾乘舒适性和智能化水平。

一、柔性温度传感阵列的制备

选用厚度58 μm 的PI/Cu膜作为核心基材, 先在其PI层表面平整贴合一层水溶性胶, 确保无气泡或褶皱以保障后续加工精度; 随后将其置于紫外纳秒激光加工系统中, 按预设参数(线宽400 μm 、线间距400–1600 μm)精准切割出类蜘蛛网结构图案。针对柔性温度传感器抗应变干扰能力差的问题, 姜涛等人研究发现, 增加电极间隙可减弱传感器形变引发的电极拉伸^[9]。基于此, 本论文设计类蜘蛛网结构时采用“由内向外线间距渐宽”方案, 通过优化电极间隙分布, 提升器件柔性耐受性。将切割后的PI/Cu膜以PI面朝上对齐PU膜预设位置轻压贴合, 接着整体浸入去离子水中溶解去除水溶性胶, 此时暴露的Cu面朝上; 经去离子水冲洗水溶性胶层后, 放入烘箱中干燥10分钟, 确保表面无水分残留以避免后续焊接不良。接下来在铜箔电极端点处, 使用低功率电烙

基金项目: 重庆市教育委员会科学技术研究计划青年项目资助项目(KJQN202502614)

铁点焊引出镀锡铜导线（导线外覆聚四氟乙烯绝缘层，防止短路），最后覆盖尺寸匹配的另一层PU膜，完成三明治结构封装。

二、结果与讨论

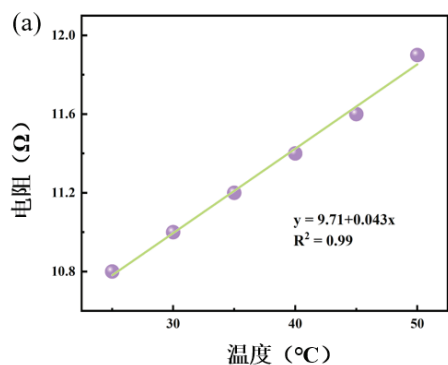
（一）传感器响应原理

金属电阻型温度传感器是一种利用金属导体电阻值随温度变化的物理特性来测量温度的传感器。其核心原理是“电阻温度效应”——绝大多数纯金属的电阻值会随温度升高而呈近似线性的增加，通过精确测量这种电阻变化，即可反推出对应的温度值。

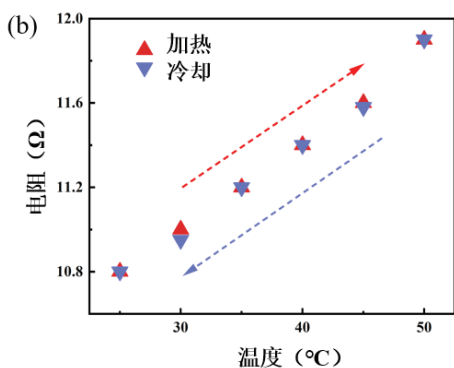
本实验中采用的感温材料为PI/Cu膜的铜膜部分，PI/Cu膜是将铜镀覆在聚酰亚胺薄膜表面而形成的一种复合材料，聚酰亚胺作为一种高性能聚合物材料，以其优异的耐热性、耐腐蚀性、良好的机械强度及电气绝缘性而闻名。当铜与聚酰亚胺结合时，这种复合材料不仅继承了聚酰亚胺的上述优点，还具备了铜的高导电性，从而成为高性能电子元件的理想选择。

（二）温度-电阻特性测试

在25-50℃区间测试了传感器的温度-电阻性能，如图1a所示，该温度传感器温度和电阻呈现良好的线性关系，其拟合方程为 $y=9.71+0.043x$ ，线性系数 $R^2=0.99$ ，表



(a) 柔性温度传感器的温度-电阻性能图



(b) 柔性温度传感器的加热-冷却图

图1

明线性度较高，可实现对温度变化的实时精准跟踪。图1b为传感器的加热-冷却循环曲线，结果显示，在升温 and 降温过程中，同一温度对应的电阻值几乎无偏差，说明传感器经加热后可完全恢复至初始状态，并且在相同温度下的电阻波动较小。这一特性证实该温度传感器对温度变化具备稳定可靠的感知能力。

（三）柔性及电学稳定性表征

图2为器件被弯折为类圆柱曲面形态的实物图，在此形态下，器件主体无明显褶皱或断裂，其表面铜基电极图案可随基底实现同步形变，证明了器件对复杂曲面的良好适配能力与优异的结构完整性。插图进一步验证了器件的性能稳定性。传感器在经历多次折叠与扭曲后，与数字万用表连接进行电学性能测试，结果显示，常温环境下显示屏可清晰读取电阻值（图示读数为10.8Ω），且该数值无明显波动，证实了器件在动态机械应力作用下，电学参数仍能保持稳定。

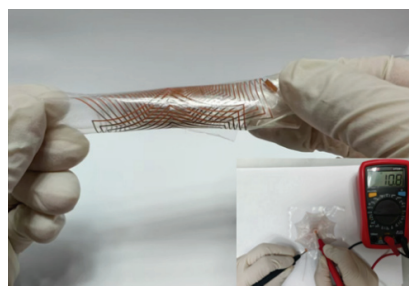


图2 柔性温度传感器进行折叠扭曲操作和电阻测试图

（四）多边形结构应变特性有限元模拟分析

本研究通过设计并对比三种不同边数的类蜘蛛网电极图案，系统分析结构参数与器件应变特性的关联规律。

随后，对三类蜘蛛网结构的中心点施加梯度化压力载荷，范围设定为10-50N，并通过有限元模拟获取不同载荷下的结构变形数据。图3a和图3b分别展示了中心点受力为20N和40N时，三种结构的变形状态。实验数据显示，对于 $F=20N$ 时，五边形类蜘蛛网结构的最大变形量为4.749mm，六边形类蜘蛛网结构的最大变形量为4.131mm，而八边形类蜘蛛网结构的最大变形量则为3.830mm；对于 $F=40N$ 时，五边形结构的最大变形量为9.497mm，六边形结构的最大变形量为8.262mm，而八边形结构的最大变形量则为7.660mm。两种情况下，八边形结构的最大变形量较五边形结构的最大变形量均降低了19.3%。通过对上述数据的分析可知：随着类蜘蛛网结构边数的增加（从五边形到八边形），其最大变形量呈现显著的递减趋势，可有效减弱传感器受力时电极的局

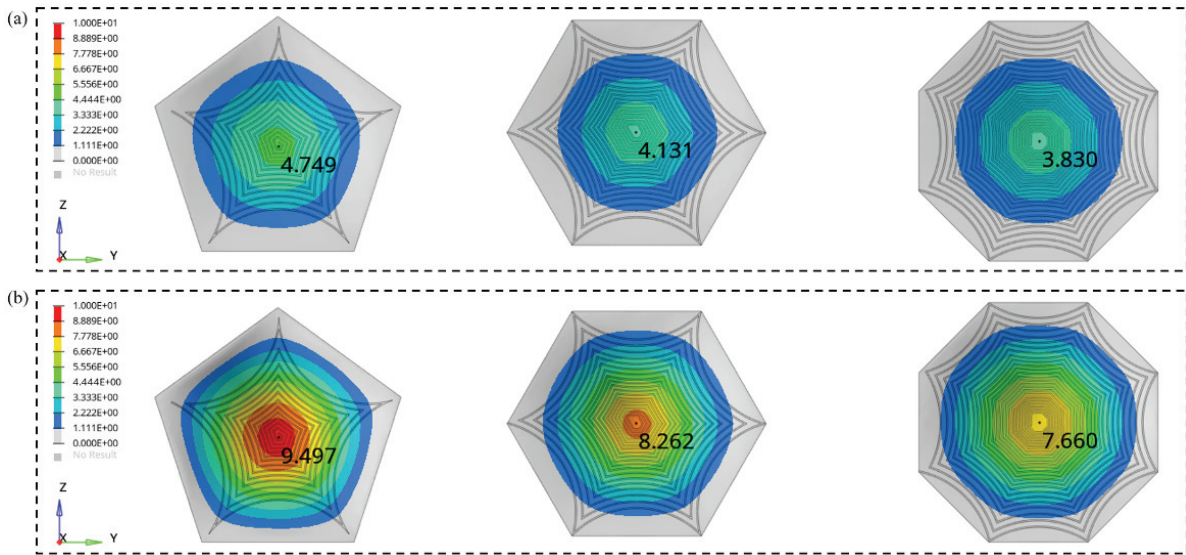


图3 不同边数类蜘蛛网结构在中心点载荷为 (a) $F=20\text{N}$ 和 (b) $F=40\text{N}$ 下的最大变形量的有限元模拟分析

部集中变形现象，进而提升器件的柔性耐受性与力学稳定性。

小结

综上所述，本研究成功制备了以PI/Cu膜为基材的类蜘蛛网结构的柔性温度传感器，通过紫外纳秒激光加工实现线宽 $400\mu\text{m}$ 、线间距 $400\text{--}1600\mu\text{m}$ （由内向外逐渐变宽）的梯度化导电网络。该器件在 $25\text{--}50^\circ\text{C}$ 工作区间内的温度-电阻特性呈现高线性度（拟合方程 $y=9.71+0.043x$ ，线性系数 $R^2=0.99$ ），加热-冷却循环中同一温度对应电阻无明显偏差，且可耐受多次弯折、扭曲变形，变形后在常温下测量的电阻值无显著波动，表明具有良好曲面贴合性与电学稳定性；同时，有限元模拟显示，八边形类蜘蛛网结构的最大变形量较五边形降低19.3%，边数的增加可有效分散局部集中应力，提升力学稳定性。该传感器能消除传统刚性传感器因贴合间隙导致的检测误差，适应动态应力环境，有望为未来汽车智能温控系统提供精准稳定的温度数据。

参考文献

[1]Li Q, Zhang L N, Tao X M, Ding X. Review of Flexible Temperature Sensing Networks for Wearable Physiological Monitoring [J]. *Advanced healthcare materials*, 2017, 6, 1601371.
[2]Luo Y F, Abidian M R, Ahn J H, Akinwande D, Andrews A M, Antonietti M, Bao Z N, Berggren M, Breke C A, Bettinger C J, et al. Technology Roadmap for Flexible

Sensors [J]. *ACS Nano*, 2023, 17, 5211–5295.

[3]Wang X W, Liu Z, Zhang T. Wearable Electronics: Flexible Sensing Electronics for Wearable/Attachable Health Monitoring [J]. *Small*, 2017, 1602790.

[4]Huynh T P, Haick H. Autonomous Flexible Sensors for Health Monitoring [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30, 1802337.

[5]Gao W, Ota H, Kiriya D, Takei K, Javey A. Flexible Electronics toward Wearable Sensing [J]. *Accounts of Chemical Research*, 2019, 52, 523–533.

[6]Liu R P, He L, Cao M J, Sun Z H, Zhu R Q, Li Y. Flexible Temperature Sensors [J]. *Frontiers in Chemistry*, 2021, 9, 539678.

[7]Usman M, Jamhour N, Hettinger J, Wei X. Smart wearable flexible temperature sensor with compensation against bending and stretching effects [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2023, 353, 114224.

[11]Su y, Ma C S, Chen J, Wu H P, Luo W X, Peng Y M, Luo Z B, Li L, Tan Y S, Omisore M O, Zhu Z F, Wang L, Li H. Printable, Highly Sensitive Flexible Temperature Sensors for Human Body Temperature Monitoring: A Review [J]. *Nanoscale research letters*, 2020, 15, 200.

[12]Jiang T, Zhao N. Design and fabrication of strain-resistant flexible temperature sensors [J]. *Electronic Components and Materials*, 2025, 44, 152–156. (in Chinese) [姜涛, 赵娜. 抗应变柔性温度传感器的设计与制[J]. *电子元件与材*, 2025, 44, 152–156.