文章编号: 1007-4252(2025)06-0503-08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0036 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0036

AgNWs/PDMS 基柔性介电传感器设计及参数优化

王洪宇, 刘昱彤, 赵晨宇, 张 帅, 董国强, 张博雯*
(天津工业大学电气工程学院, 天津 300387)

摘要: 复合材料凭借优异的综合性能在可穿戴电子设备领域得到了广泛应用, 其中的固化过程是决定材料机械性能的关键环节之一。针对当前的固化过程监测方法可能造成材料性能下降的问题, 提出一种可实现嵌入式无损监测的 AgNWs/PMDS 基柔性介电传感器, 并通过 COMSOL 仿真对其参数进行优化。仿真结果表明, 优化后的传感器在采用较小的电极长度(30 mm)和较少的电极数目(10), 并保持电极宽度与间距相等的参数配置下, 可在将寄生电容控制在 21.3 pF 的同时实现 0.014 3 pF·mm^{-2} 的高灵敏度。优化后的介电传感器不仅具有优异的柔韧性, 能够贴合复杂三维曲面, 还显著提升了监测性能, 为复合材料在可穿戴电子设备领域的应用提供了一种高效而可靠的解决方案。

关键词: 复合材料; 柔性介电传感器; 叉指电极; COMSOL 有限元仿真
中图分类号: TP212 **文献标志码:** A

Design and parameters optimization of flexible dielectric sensors based on AgNWs/PMDS

WANG Hongyu, LIU Yutong, ZHAO Chenyu, ZHANG Shuai, DONG Guoqiang, ZHANG Bowen*
(School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Composite materials are extensively utilized in wearable electronic devices due to their superior comprehensive performance. The curing process is crucial in determining the mechanical performance of these materials. Addressing the limitations of current curing process monitoring methods, which often compromise material performance, this paper introduces a flexible dielectric sensor capable of embedded nondestructive monitoring. The sensor's parameters are optimized through COMSOL simulation. The simulation findings indicate that the optimized sensor employs a reduced electrode length (30 mm) and fewer electrodes (10), while maintaining the same electrode width and spacing in its parameter configuration. This design achieves a high sensitivity of 0.014 3 pF·mm^{-2} while ensuring that the parasitic capacitance remains controlled at 21.3 pF. The optimized flexible dielectric sensor

收稿日期: 2025−05−07; **修订日期:** 2025−06−03
基金项目: 天津工业大学 2022 级大学生创新创业训练项目计划资助项目 (No.202410058016).
作者简介: 王洪宇(2004—), 男, 学士, 主要研究方向为电气工程及其自动化(E-mail: 728443621@qq.com).
通信作者: 张博雯(1992—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力电子器件 (E-mail: bowenzhang@tiangong.edu.cn).

demonstrates excellent flexibility for conforming to complex three-dimensional surfaces and enhances the stability of sensor monitoring performance. This advancement provides an efficient and reliable solution for applying composites in wearable electronic devices.

Key words: composite material; flexible dielectric sensor; interdigitated electrode; finite element simulation with COMSOL

0 引言

可穿戴电子器件技术的快速发展推动着柔性复合材料研究向更深层次拓展。基于环氧树脂构建的多材料协同体系，能够实现优异的导电性、柔韧性及环境适应性，被广泛应用于运动追踪[1]、医疗健康[2]等领域的可穿戴电子设备中。复合材料的机械性能与其固化过程，尤其是基材在相变阶段的表现，密切相关[2-4]。因此，精确监控固化过程对优化材料性能、缩短生产周期具有重要意义，并可为高性能可穿戴电子设备的市场化开发提供可靠保障。

目前，固化监测技术正从传统的离线分析（如差示扫描量热法、动态力学分析以及介电分析等）向在线检测转变。光纤布拉格光栅技术可通过波长偏移量与固化度的关联分析来实现对固化过程监测，但存在信号随材料厚度增加而衰减的物理局限性。超声波检测法通过声波传播特性来表征固化进程，但环境噪声的干扰易导致检测信噪比降低[5-8]。相比之下，介电传感器通过实时监测电容和介电损耗因子的变化，能够有效消除环境光、机械振动等因素干扰，展现出更优的工程适用性[9-10]。然而，现有介电传感器普遍采用刚性基底（如玻璃、印制电路板、陶瓷等）[11-13]，其力学性能缺陷会引发两个关键问题：界面应力集中效应导致微裂纹扩展；同时共形贴附性不足导致寄生电容增大。

针对上述问题，人们开发了基于柔性基底的介电传感技术，相关研究已取得阶段性进展。聚酰亚胺（PI）基传感器虽具备工艺成本优势，但仍存在拉伸性不足且易产生裂纹的缺陷[14]。聚二甲基硅氧烷（PDMS）因其优异的本征柔性和生物相容性，成为构建柔性传感器基底的理想候选材料。已有研究团队通过构建碳纳米管/PDMS 异质结构[15]及石墨烯泡沫/PDMS 复合体系[16]，显著提升了器件的拉伸性。然而，现有柔性介电传感器普遍存在阻抗和寄生电容过大的问题，导致传输过程中信号强度衰减，从而影响测量结果的准确性。

本文提出一种具有三维曲面适应性的 AgNWs（Ag 纳米线）/PDMS复合材料基介电传感器。通过 COMSOL Multiphysics 软件建立传感器的三维几何模型，并对关键参数进行优化，系统研究电极长度、数目、宽度及间距等几何特征对寄生电容和灵敏度的影响机制。该方案可显著提升柔性介电传感器的力学性能和电气性能，为柔性传感器在可穿戴电子产品领域的研究和应用提供重要技术支持。

1 介电传感器监测的原理和模型

1.1 介电传感器在复合材料固化中的监测原理

图 1 展示了基于 AgNWs/PDMS 的柔性介电传感器示意图。其中，AgNWs 叉指电极层作为传感器的核心部件，由 PDMS 封装，以实现三维曲面适应性。这种结构能够克服传统刚性基底传感器与材料表面接合时无法紧密贴合待测物的缺陷，降低传感器与材料之间缝隙对测量结果的影响，进而提高测量精度。叉指电极的激励电极施加正电压，接地电极维持零电位，二者之间形成两类典型的电场分布：中部区域呈现均匀辐射状电场，边缘区域则表现出电场线弯曲的边缘效应（图 2）。

与平行板电极相比，该结构在固化过程监测方面展现出显著优势，不仅弥补了电极间空间有限的不足，还利用边缘电场效应提升了对材料变化的敏感响应能力。在复合材料的固化过程中，复合材料位于电极上方，电场线从激励电极发出，经材料介质后进入接地电极。材料黏度的演变会显著影响离子迁移率与介电常数，从而改变叉指电极间的电场分布，最终导致传感器电容值的变化。基于这一特性，可通过实时监测电容变化并结合固化动力学模型来精确识别固化过程，满足复合材料性能提升对高精度监测的需求。

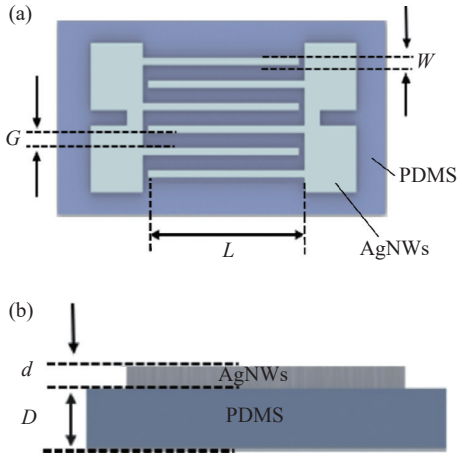

图 1　(a)叉指电极结构图; (b)传感器横截面示意图

Fig. 1 (a) Structural diagram of the interdigital electrode; (b) schematic diagram of sensor cross-section

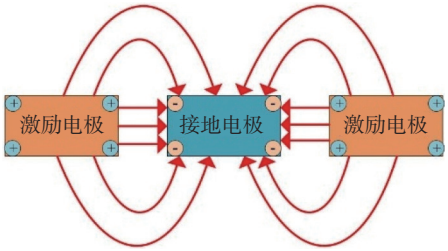

图 2　激励电极与接地电极间的电场分布

Fig. 2 Electric field distribution between the excitation electrode and the ground electrode

依据介质分层电容理论[17], 一对叉指电极之间的电容 C_0 由 3 个部分组成: 激励电极与接地电极之间的平行板电容 C_d、复合材料固化过程中的电容 C_m 以及传感器柔性基底的电容 C_b, 其表达式为:

$$C_0 = C_d + C_m + C_b \tag{1}$$

对于具有 N 个叉指电极的介电传感器, 其总电容 C[18-19] 可表示为:

$$C = C_0(N-1) \tag{2}$$

由于 C_d 为两个指状电极之间的平行板电容, 由平板电容公式可知:

$$C_d = \varepsilon_0 \varepsilon_x \frac{Ld}{G} \tag{3}$$

式中, ε_0 为真空介电常数, ε_x 为两个指状电极之间缝隙的介电常数, L 为电极长度, d 为电极厚度, G 为电极间距。

通过保角映射法可以求得 C_m 与 C_b 之和:

$$C_m + C_b = L\varepsilon_0 \frac{\varepsilon_0 + \varepsilon_r}{2} \frac{K\sqrt{1-K^2}}{K(\eta)} \tag{4}$$

式中, ε_r 为复合材料的介电常数, K 为第一类完整椭圆积分, η 为金属化率。其中, η 和 K 的表达式为:

$$\eta = \frac{W}{W+G} \tag{5}$$

$$K = \int_0^1 \frac{\mathrm{d}x}{\sqrt{(1-x^2)(1-x^2\eta^2)}} \tag{6}$$

式中, W 为电极宽度, x 为椭圆积分变量。

当介电传感器的叉指电极的长度远大于其宽度时, 其电容 C[20] 可表示为:

$$C = \frac{1}{h\pi}\left\{\frac{\varepsilon_0(\varepsilon_b+\varepsilon_r)}{\pi}\ln\left[\left(1+\frac{2W}{G}\right)+\sqrt{\left(1+\frac{2W}{G}\right)^2-1}\right]\varepsilon_0\varepsilon_x\frac{Ld}{G}\right\}(N-1) \tag{7}$$

式中, h 为复合材料厚度, ε_b 为柔性基底的介电常数。由式 (7) 可知, 电容与 $(N-1)$ 和电极长度 L 成正比; 此外, 当传感器的几何参数固定时, 监测电容也与复合材料的介电常数成正比。这表明电容可用于监测固化过程。

值得注意的是, 过大的寄生电容会对介电传感器性能产生不利影响, 具体表现为削弱其对微小电容变化的检测能力、降低检测灵敏度、延长充放电时间从而影响实时检测, 并会降低信噪比和检测精度。因此, 优化电极参数以抑制寄生电容是提升传感器灵敏度、响应速度和检测精度的关键。

1.2　介电传感器的有限元建模设计

平面叉指电容式传感器的电场分布呈现从激励电极向四周发散的三维特性, 这种电场的非均匀性使得对其结构的分析更为复杂。为此, 本文利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件对介电传感器进行三维模型设计及有限元仿真分析。使用 COMSOL 6.2 版本的 AC/DC 模块, 对传感器叉指电极的 W、L、G 及 N 等参数进行优化设计, 以确定柔性介电传感器的最佳参数组合。在确定参数后, 进一步通过仿真对 h 进行分析, 探究复合材料用量对传感器性能的影响。

仿真模型采用 3 层结构设计: 底层为 PDMS 柔性基底(厚度 D = 1 mm, 介电常数 ε_b = 2.75), 中间层为银纳米线叉指电极(厚度 d = 55 μm, 介电常数为 6), 表层为环氧树脂固化层(介电常数 ε_r 可在 1~10 范围内调节, h = 1 mm)。通过改变环氧树脂的介电常数, 动态模拟其固化过程中电容的变化。

基于上述分析，对电极长度、电极数目和金属化率 3 个参数进行控制变量研究，探讨不同参数对监测电容和灵敏度的影响。在此过程中，引入灵敏度 m_c 和单位面积灵敏度 β：

$$m_c = \frac{C_2 - C_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \tag{8}$$

$$\beta = \frac{m_c}{S} \tag{9}$$

式中，C_1 和 C_2 分别为环氧树脂介电常数 ε_r 取 ε_1 和 ε_2 时的电容，S 为传感器面积。

结合实际工程应用的设计范围与控制变量方法，设置各参数的取值范围如下：电极长度为 30~40 mm，电极数目为 10~26，金属化率为 0.2~0.8，环氧树脂介电常数为 1~10。按照表 1 中的参数组合，计算监测电容和单位面积灵敏度。

表 1　叉指电极参数设计

Table 1　Parameter design of interdigital electrodes

长度/mm	宽度/mm	间距/mm	数目
30	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	10
34	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	10
36	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	10
40	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	10
30	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	10
30	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	18
30	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	26
30	0.2 (η = 0.2)	0.8 (η = 0.2)	10
30	0.4 (η = 0.5)	0.4 (η = 0.5)	10
30	0.8 (η = 0.8)	0.2 (η = 0.8)	10

最后，在传感器各项尺寸参数确定后，进一步分析固化材料厚度对传感器性能的影响。当复合材料固化量增加时，其厚度会相应增大。因此，在保持上述尺寸参数不变的前提下，设置环氧树脂厚度为 1~10 mm 的对照组，并通过参数化扫描实现环氧树脂介电常数的动态模拟（ε_r = 1~10，步长为 1），以分析固化材料厚度对传感器性能的影响。

2　结果与讨论

2.1　电极长度对介电传感器性能影响的影响

由式 (3) 可知，随着电极长度的增加，传感器叉指电极层的总面积将增大，从而导致激励电极与接地电极之间的平行板电容增加。在保持 N = 10、η = 0.5、W = 0.4 mm 以及 G = 0.4 mm 的条件下，选取电极长度分别为 30 mm、32 mm、34 mm、36 mm、38 mm 和 40 mm 的参数组合，开展有限元仿真分析，所得电容和灵敏度响应特性如图 3 和图 4 所示，可以看出：当传感器尺寸确定时，电容随 ε_r 的增加而升高；在固化程度相同的情况下，电极长度越长，电容值越高。

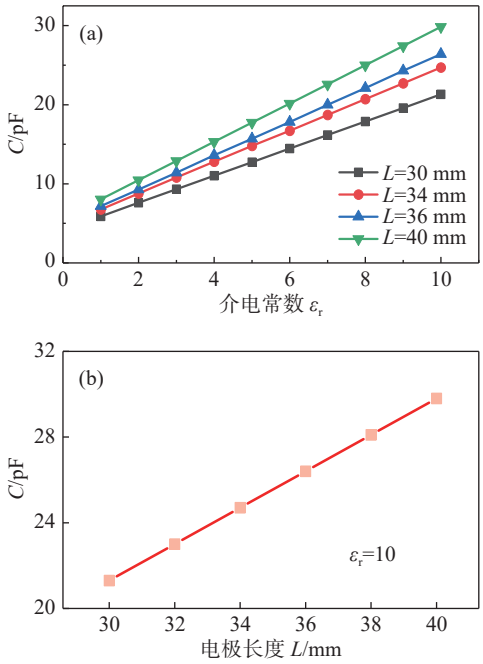

图 3　(a)不同电极长度下电容随 ε_r 的变化；(b) ε_r = 10 时电容随 L 的变化

Fig. 3 (a) Variation of capacitance with ε_r with different electrode lengths; (b) variation of capacitance with L at ε_r = 10

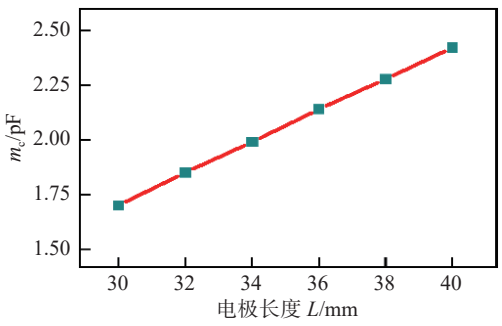

图 4　不同电极长度时灵敏度变化曲线

Fig. 4 Variation curve of sensitivity at different electrode lengths

定量而言，当 ε_r=10 时，电容值随电极长度的增加从 21.3 pF 提升至 29.8 pF，增幅达 40%，如图 3(b) 所示。在其他 ε_r 条件下，电容的增幅同样约为 40%。

同时, 随着电极长度从 30 mm 增至 40 mm, 传感器的电容灵敏度从 1.71 pF 提升至 2.42 pF, 如图 4 所示。值得注意的是, 电容灵敏度与电容均随电极长度 L 呈现线性增长趋势, 线性拟合度高达 0.99。这一结果表明, 传感器的寄生电容和灵敏度均与电极长度成正比, 电极长度每增加 10%, 电容约提升 19.95%, 灵敏度约提高 20.75%, 与 1.1 节的结论相一致。

值得指出的是, 复合材料在固化过程中会出现黏度骤降及交联反应等现象, 而长电极的信号扩散路径较长, 可能导致信号滞后, 无法实时捕捉瞬态变化。此外, 传感器通常需要嵌入或贴附于复合材料表面进行监测, 而长电极容易受机械应力影响发生断裂或接触失效。因此, 在实际应用中需综合权衡灵敏度、寄生电容以及电极长度之间的关系。在条件允许的情况下, 应尽可能选择较短的电极, 这不仅可以减小寄生电容, 还能降低制造成本和工艺复杂度。综上所述, 本文确定 30 mm 为最优电极长度参数。

2.2　电极数目对介电传感器性能的影响

从图 2 的电场分布可以看出, 介电传感器中的电场线始终由激励电极指向接地电极, 且电极边缘区域的电场线分布较为密集。因此, 随着叉指电极数目的增加, 边缘效应增强, 有限面积内的电场线分布更加密集, 电场强度也随之增大。寄生电容主要源于相邻电极之间的电场耦合, 叉指电极数目的增加会显著增强这种耦合效应, 从而导致寄生电容的增大。在 L = 30 mm、η = 0.5、W = 0.4 mm 以及 G = 0.4 mm 的条件下, 选取电极数目分别为 10、14、18、22 和 26 的参数组合进行仿真分析。由图 5 可知, 电容与ε_r 呈正相关的关系, 在相同的固化程度下, 电极数目越多, 电容值越大。

由图 5(b) 可知, 在ε_r 为 10 的条件下, 当电极数目从 10 增加至 26 时, 对应电容值从 21.3 pF 提升至 80.9 pF。如图 6 所示, 随着电极数目的变化, 灵敏度从 1.71 pF 提升至 6.45 pF。电容灵敏度与电容均随电极数目的增加均呈现出线性增长趋势, 这一现象源于电极数目增加所带来的双重效应: (1)根据式(3), 电极数目的增加导致有效传感面积增大, 从而使相邻电极之间的平行板电容增加; (2)电极数目增加后, 相邻电极间电场的有效耦合面积增大,

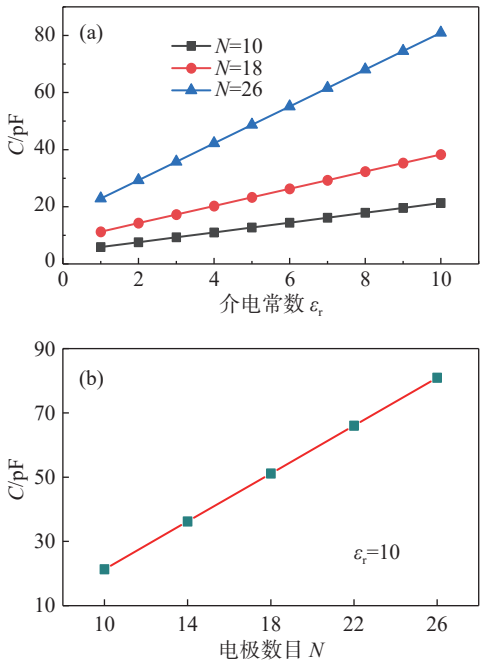

图 5　(a)不同电极数目下电容随ε_r 的变化; (b)ε_r = 10 时电容随 N 的变化

Fig. 5　Variation of capacitance with ε_r with different numbers of electrode; (b) variation of capacitance with N at ε_r = 10

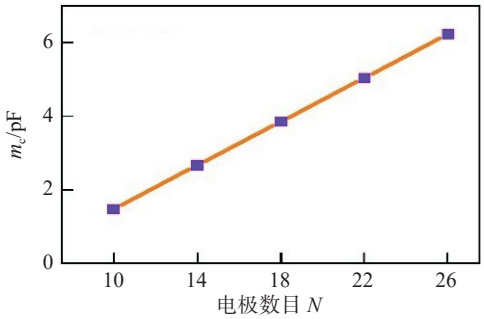

图 6　不同电极数目时灵敏度变化曲线

Fig. 6　Variation curve of sensitivity at different numbers of electrodes

边缘电场叠加效应增强, 这种优化的电场分布能更高效地捕捉介电特性的微小变化, 从而进一步提升电容值和灵敏度。

值得注意的是, 电极数目的增加虽能使灵敏度提升, 但会导致介电传感器的寄生电容和整体尺寸的显著增大。为满足可穿戴电子设备对材料微型化的需求, 应在保证性能的前提下尽可能减少电极数目。因此, 本文确定最优电极数目为 N=10。

2.3　电极宽度及间距对介电传感器性能的影响

上述仿真结果表明, 传感器的电极长度与电极数目均与电容和灵敏度呈现显著的正相关性。根

据式 (7), 电极宽度与电极间距的比值会影响电容值。通过对金属化率进行仿真分析, 探究在满足传感器尺寸要求的前提下电极宽度与电极间距对传感器灵敏度的影响规律。本次仿真分析在 L=30 mm、N=10 以及 W+G = 1.0 mm 的条件下, 分别选取金属化率为 0.20、0.35、0.50、0.65 和 0.80 的参数组合进行研究。

图 7 定量显示了 η 对传感器性能的影响规律。在不同 η 下, 电容均随ε_r 的增大呈现线性增长趋势。然而, 在固化程度(ε_r = 10)固定(图 7(b))的条件下, η 从 0.2 增加至 0.8 时, 电容由 13.4 pF 提升至 40 pF, 增幅达 198%。具体而言, η 从 0.2 增加至 0.5 时, 电容由 13.4 pF 提升至 21.3 pF, 增幅为 58%; 而 η 从 0.5 增加至 0.8 时, 电容由 21.3 pF 提升至 40 pF, 增幅达 87%。由此可见, 金属化率对寄生电容的影响呈现非线性规律, 且随着金属化率的升高, 电容的增长速率逐步加快。这种非线性特征主要源于以下两种竞争机制: (1)当 η 较低时, 电容的增加主要受叉指电极有效面积增大的影响; (2)当 η 达到较高水平时, 边缘效应的作用显著增强, 从而导致电容迅速提升。因此, 在传感器设计过程中, 应优化电极宽度与电极间距的比值, 以抑制寄生电容的过度增长, 从而确保传感器测量的稳定性和精度。

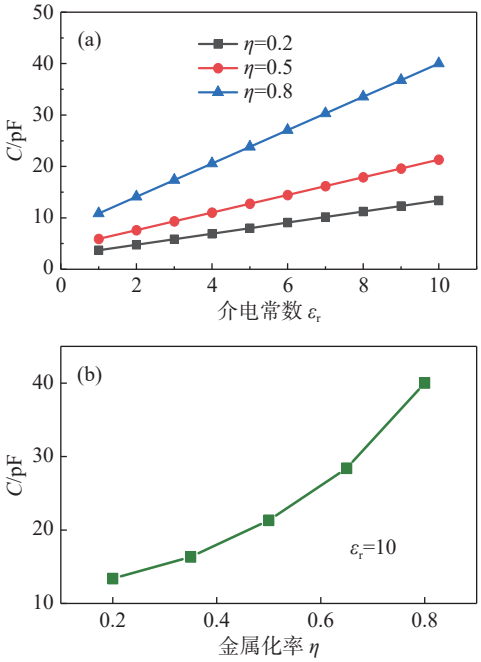

图 7 (a)电容随ε_r 的变化; (b)ε_r = 10 时电容随 η 的变化

Fig. 7 Variation of capacitance with ε_r; (b) variation of capacitance with η at ε_r = 10

由图 8 可知, 当 η 从 0.2 增加至 0.8 时, 单位面积灵敏度呈现先增大后减小的趋势, 并在 η=0.5 时达到最大值 0.0143 pF·mm^{-2}。单位面积灵敏度随 η 的变化呈现先增大后降低的趋势。η=0.5 相较于 η=0.2, 灵敏度提升了 19%($\Delta\beta$=0.0027 pF·mm^{-2}), 相较于 η=0.8 则提升了 59%($\Delta\beta$=0.0053 pF·mm^{-2})。上述结果表明, 金属化率对传感器灵敏度的影响具有非线性特征。由图 9 的仿真结果可以看出, 金属化率直接影响叉指电极间的电势分布。高的金属化率虽能增强电势, 但会加剧边缘效应, 导致寄生电容过大; 而过低的金属化率则会使电极间的电场分布过于稀疏, 从而降低传感器的灵敏度和动态监测性能。

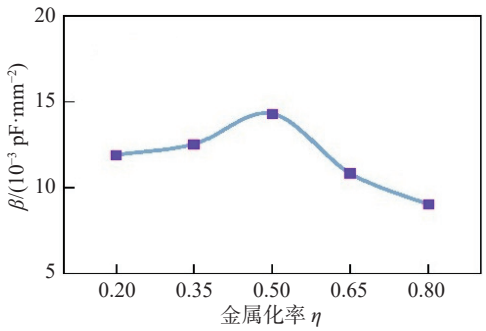

图 8 不同金属化率下单位面积灵敏度的变化曲线

Fig. 8 Variation curve of unit sensitivity at different metallization rates

综合上述仿真分析结果, 随着金属化率的增加, 传感器电容变化愈加显著, 单位面积灵敏度呈现先增后降的趋势。为优化传感器性能, 实现灵敏度与寄生电容的平衡, 选取 η=0.5 作为最优参数。该参数下, 传感器的单位面积灵敏度与 η=0.20、0.35、0.65 和 0.80 时相比, 分别提升 19%、14%、32% 和 59%, 在尽可能降低寄生电容的同时, 有效提升了传感器灵敏度。

2.4 固化材料厚度的仿真分析

仿真结果表明, 在传感器既定尺寸参数条件下, 监测电容与环氧树脂的介电常数呈正相关。当复合材料固化量增加时, 环氧树脂厚度相应增大, 但在实际应用中需要保持电容变化关系不变。因此, 基于已优化的传感器电极参数(包括长度、数目、间距及宽度), 在 1~10 mm 的环氧树脂厚度范围内

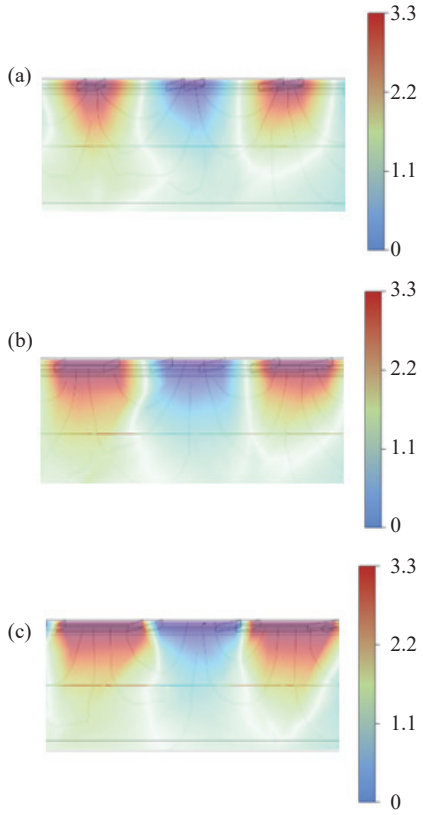

图 9　(a)$\eta=0.2$、(b)$\eta=0.5$、(c)$\eta=0.8$ 时的电势分布(单位: V)

Fig. 9　Potential distribution (unit: V) at (a) η = 0.2, (b) η = 0.5, (c) η = 0.8

进行仿真分析, 结果如图 10 所示。

可以看出, 在介电常数确定(固化程度恒定时)的条件下, 不同环氧树脂厚度对应的监测电容值保持稳定, 波动幅度≤ 2%。这表明复合材料厚度对传感器性能无显著影响, 进一步验证了传感器在不同应用场景下的稳定性。

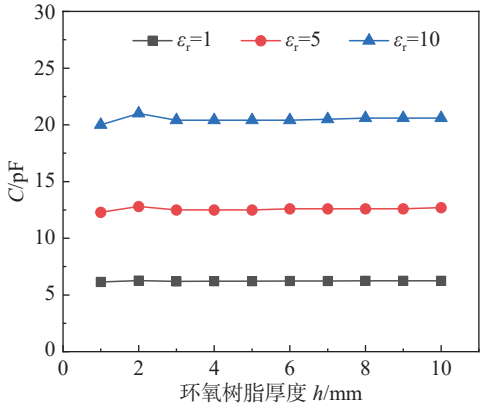

图 10　$\varepsilon_r=0.2$、$\varepsilon_r=0.5$ 及$\varepsilon_r=0.8$ 时电容随 h 的变化

Fig. 10　Variation of capacitance with h at ε_r = 0.2, ε_r = 0.5, and ε_r = 0.8

3　结论

本文基于介质分层理论与保角映射法, 系统研究了柔性介电传感器的结构参数对其在复合材料固化过程监测中性能的影响机制。基于 COMSOL Multiphysics 软件构建的三维模型仿真结果表明: 电极长度与数目的增加会显著提升寄生电容; 随着金属化率的增大, 传感器单位面积的灵敏度呈先增后减的趋势, 并在金属化率为 0.5 时达到峰值, 此时电容显著增加且增长率逐步加快。

基于此, 本文提出相应的优化设计方案: 在复合材料固化监测应用中, 应选择较短的电极长度与较少的电极数目, 并采用等宽电极与等间距设计(金属化率为 0.5), 从而在降低寄生电容的同时实现最优的灵敏度。此外, 传感器在不同厚度的固化材料中均表现出优异的监测稳定性。因此, 经优化的三维曲面自适应型柔性介电传感器兼具灵敏度高、柔韧性优异、微型化和稳定性高等特征, 在用于可穿戴电子产品的复合材料的固化检测方面展现出重要的应用前景。

参考文献:

[1] LIN Q J, ZHANG F Z, XU X Y, et al. A flexible pressure sensor based on graphene/epoxy resin composite film and screen printing process[J]. Nanomaterials, 2023, 13(19): 2630.

[2] YANG Z P, LI H Q, ZHONG Y C, et al. Functional epoxy elastomer integrating self-healing capability and degradability for a flexible stretchable strain sensor[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2022, 14(39): 44878-44889.

[3] BUDHE S, BANEA M D, DE BARROS S, et al. An updated review of adhesively bonded joints in composite materials[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 72: 30-42.

[4] HÜBNER M, DUMSTORFF G, KAHALI MOGADDAM M, et al. Online monitoring of the curing of adhesives with a miniaturised interdigital sensor using impedance spectroscopy[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2018, 32(7): 772-786.

[5] YANG Y, CHIESURA G, LUYCKX G, et al. Development of a dielectric sensor system for the on-line cure monitoring of composites[J]. Procedia Technology, 2014, 15: 631-637.

[6] KONSTANTOPOULOS S, FAUSTER E, SCHLEDJEWSKI R. Monitoring the production of FRP composites: A review of

in-line sensing methods[J]. Express Polymer Letters, 2014, 8(11): 823-840.

[7] BLÖßL Y, HEGEDÜS G, SZEBÉNYI G, et al. Applicability of fiber Bragg grating sensors for cure monitoring in resin transfer molding processes[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2021, 40(19/20): 701-713.

[8] YANG Y, CHIESURA G, VERVUST T, et al. Design and fabrication of a shielded interdigital sensor for noninvasive in situ real-time production monitoring of polymers[J]. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2016, 54(20): 2028-2037.

[9] LIONETTO F, MAFFEZZOLI A. Monitoring the cure state of thermosetting resins by ultrasound[J]. Materials, 2013, 6(9): 3783-3804.

[10] LIONETTO F, RIZZO R, LUPRANO V A M, et al. Phase transformations during the cure of unsaturated polyester resins[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 370(1/2): 284-287.

[11] GARDEN L, PETHRICK R A. Critique of dielectric cure monitoring in epoxy resins: Does the method work for commercial formulations?[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017, 74: 6-14.

[12] DE ANDRADE RAPONI O, DE ANDRADE RAPONI R, BARBAN G B, et al. Development of a simple dielectric analysis module for online cure monitoring of a commercial epoxy resin formulation[J]. Materials Research, 2017, 20(Suppl. 2): 291-297.

[13] YENILMEZ B, MURAT SOZER E. A grid of dielectric sensors to monitor mold filling and resin cure in resin transfer molding[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009, 40(4): 476-489.

[14] YANG Y, XU K, VERVUST T, et al. Multifunctional and miniaturized flexible sensor patch: design and application for in situ monitoring of epoxy polymerization[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2018, 261: 144-152.

[15] KONG J H, JANG N S, KIM S H, et al. Simple and rapid micropatterning of conductive carbon composites and its application to elastic strain sensors[J]. Carbon, 2014, 77: 199-207.

[16] JEONG Y R, PARK H, JIN S W, et al. Highly stretchable and sensitive strain sensors using fragmentized graphene foam[J]. Advanced Functional Materials, 2015, 25(27): 4228-4236.

[17] 朱永灿, 熊浩男, 田毅, 等. 基于叉指电容效应的光伏组件覆冰雪监测技术 [J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 20-28.

[18] ANGKAWISITTPAN N, MANASRI T. Determination of sugar content in sugar solutions using interdigital capacitor sensor[J]. Measurement Science Review, 2012, 12(1): 8-13.

[19] ONG K G, GRIMES C A. A resonant printed-circuit sensor for remote query monitoring of environmental parameters[J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9(4): 421-428.

[20] THAO N. Capacitive sensing: Water level application[D]. Helsinki: Helsinki Metropolia University of Applied Sciences, 2016: 9-21.